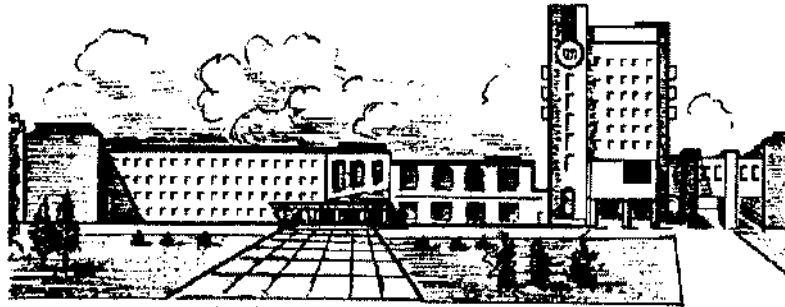


ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 1(39)



Чернігів 2025

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 4 від 31.03.2025 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2019 р. № 975 (зі змінами від 09.02.2021 № 157), відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

Технічні науки та технології: науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – № 1(39). – 380 с.

У журналі вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у науковому напрямі «Технічні науки» за спеціальностями: прикладна механіка, матеріалознавство, машинобудування, інформаційно-комп'ютерні технології, електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, хімічні та харчові технології, будівництво та геодезія. Статті прорецензовані провідними вченими у відповідних галузях знань.

Журнал «Технічні науки та технології» буде корисним для науковців, науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та студентів технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 62:67.05

Головний редактор:

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка».

Заступник головного редактора:

Болотов М. Г., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Члени редакційної колегії:

Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування

Бойко С. В., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Дмитрієв Д. О., доктор технічних наук, професор, Херсонський національний технічний університет;

Єрошенко А. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Марков О. Є., доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія;

Новомлинцев О. О., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Пилипенко О. І., доктор технічних наук, професор, почесний член редколегії;

Повстяной О. Ю., доктор технічних наук, доцент, Луцький національний технічний університет;

Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського;

Сіра Н. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Федориненко Д. Ю., доктор технічних наук, професор, Tohoku University, Японія;

Ющенко С. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Michał Bembek, Doctor of Engineering Sciences, Professor, AGH University of Krakow (Krakow, Poland).

Інформаційно-комп'ютерні технології

Азаров О. Д., доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет;

Дорош М. С., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Єременко В. С., доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського;

Зайцев С. В., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Криворучко О. В., доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Мелешко С. В., доктор технічних наук, професор, Центральноукраїнський національний технічний університет;

Павленко П. М., доктор технічних наук, професор, Державний університет «Київський авіаційний інститут»;

Семенов С. Г., доктор технічних наук, професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця;

Цюцюра С. В., доктор технічних наук, професор, Державний торговельно-економічний університет.

Енергетика, електротехніка та електромеханіка

Вінніков Д., доктор технічних наук, професор, Таллінський університет технологій (Естонія);

Волков І. В., доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки НАН України;

Галкін І., доктор технічних наук, професор, Ризький технічний університет (Латвія);

Гусев О. О., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Приступа А. Л., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Ромеро-Кадавал Е., доктор технічних наук, професор, Університет Естремадури (Іспанія);

Степенко С. А., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Хімічні та харчові технології

Антонюк І. Ю., кандидат технічних наук, доцент, Державний торговельно-економічний університет;

Буяльська Н. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Гуменюк О. Л., кандидат хімічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Дударев І. М., доктор технічних наук, професор, Луцький національний технічний університет;

Звірко О. І., доктор технічних наук, професор, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України;

Плаван В. П., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну;

Самохвалова О. В., кандидат технічних наук, професор, Харківський державний університет харчування та торгівлі;

Сиза О. І., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка;

Трує І. М., доктор технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського;

Цибуля С. Д., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

Челябієва В. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Будівництво та геодезія

Білік С. І., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Крячок С. Д., кандидат технічних наук;

Михайловський Д. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Палайниця Б. Б., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Львівська політехніка»;

Савенко В. І., кандидат технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Сахно Є. Ю., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

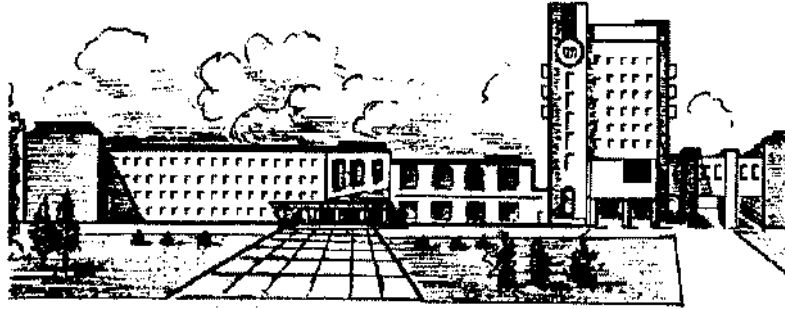
Терещук О.І. кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Юрченко В. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури.

ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
CHERNIHIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY



TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 1(39)



Chernihiv 2025

UDC 62:67.05
DOI: 10.25140/2411-5363-2025-1(39)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 13 dated 23.12.2024). Scientific journal "Technical sciences and technologies" is included into the list of scientific specialized editions of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 11, 2019 № 975 (as amended from February 9, 2021 № 157), according to which magazine is assigned a category «B».

Technical sciences and technologies : scientific journal / Chernihiv Polytechnic National University. – Chernihiv : Chernihiv Polytechnic National University, 2025. – № 1(39). – 380 p.

This journal contains articles devoted to theoretical and experimental research in the scientific direction "Technical Sciences" by specialties: applied mechanics, materials science and machine building, information and computer technologies, electric power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering, chemical and food technologies, construction and geodesy. The articles are reviewed by leading scientists in relevant fields of knowledge.

Journal "Technical sciences and technologies" will be useful for the scientific and technical workers, postgraduates, master students and students of higher technical educational establishment.

UDC 62:67.05

Editor in chief:

Kazymyr V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Deputy Editor in chief:

Bolotov M.G., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University.

Members of the Editorial Board:

Applied mechanics, materials science and machine building

Boyko S.V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Bolotov H.P., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Dmytriiev D.O., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kherson National Technical University;

Yeroshenko A.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Kalchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Kalchenko V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Markov O.Ye., Doctor of Technical Sciences, Professor, Donbaska derzhavna mashynobudivna akademiia;

Novomlynets O.O., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Pilipenko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorary Member of the Editorial Board;

Povstianoi O.Yu., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Lutsk National Technical University;

Sapon S.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;

Sira N.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University»;

Fedorynenko D.Yu. Doctor of Technical Sciences, Professor, Tohoku University, Japan;

Yushchenko S.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University»;

Michał Bemberek, Doctor of Engineering Sciences, Professor, AGH University of Krakow (Krakow, Poland).

Information and computer technologies

Azarov O.D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University;

Dorosh M.S., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University»;

Yeremenko V.S., Doctor of Technical Sciences, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;

Zaitsev S.V., Doctor of Technical Sciences, Chernihiv Polytechnic National University.

Kazymyr V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Kryvoruchko O.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine;

Meleshko Ye.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Central Ukrainian National Technical University;

Pavlenko P.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, State University "Kyiv Aviation Institute";

Semenov S.H., Doctor of Technical Sciences, Professor, Semyon Kuznets Kharkiv National Economic University;

Tsutsiura S.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, State Trade and Economic University.

Power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering

Vinnikov D., Doctor of Science, Senior Researcher, Head of Power Electronics R&D Group, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia;

Volkov I.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine;

Galkin I., Doctor of Science, Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia;

Husev O.O., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Denysov Yu.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Prystupa A.L., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Romero-Cadaval E., Doctor of Science, Professor, University of Extremadura, Badajoz, Spain;

Stepenko S.A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Chemical and food technologies

Antoniuk I.Yu., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, State University of Trade and Economics;

Buialska N.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Gumeniuk O.L., PhD in Chemical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Dudarev I.M., Doctor of Technical Science, Professor, Lutsk National Technical University;

Zvirko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine;

Plavan V.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Technologies and Design;

Samokhvalova O.V., PhD in Technical Sciences, Professor, Kharkiv State University of Food Technology and Trade;

Syza O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Taras Shevchenko National University «Chernihiv Collegium»;

Trus I. M., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;

Tsybulia S.D., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Cheliabieva V.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.

Construction and geodesy

Bilyk S.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Kriachok S.D., PhD in Technical Sciences;

Mykhailovskiy D.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Palianysia B.B., PhD in Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University;

Savenko V.I., PhD in Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Sakhno E.Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;

Shults R.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Tereshchuk O.I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University

Yurchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Kyiv National University of Construction and Architecture.



ЗМІСТ

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

Болотов Г. П., Болотов М. Г., Гречка В. В., Ососок М. О. Конструктивні особливості установок для дифузійного зварювання в тліючому розряді.....	9
Гапонова О. П., Тарельник В. Б., Тарельник Н. В., Лапоног Г. П., Торгачов Д. В. Підвищення гідроабразивної зносостійкості робочих поверхонь комбінованими методами на основі електроіскрового легування і лазерного оброблення.....	22
Зенкін М. А., Шведченко О. І. Вплив конструктивних особливостей механічних приводів рулонних друкарських машин на точність суміщення фарб.....	32
Регей І. І., Книш О. Б., Книш Р. О., Терновий А. М., Романчук І. О. Аналітична оцінка лінійного зміщення центра маси натискного сегмента в процесі штанцювання розгортки картонного пакування.....	42
Сахно Є. Ю. Моделювання процесів роботи модернізованого гідростатичного підшипника з використанням елементів теорії графів.....	50
Васильєв О. С., Яковенко А. М. Визначення кінетичної енергії вібраційної машини ВП-10.....	59
Вербі І. І., Даниленко О. В. Відновлення верстатобудування – умова розвитку промисловості України.....	69
Казляк О., Козирєв О., Ключников Ю. В., Левко К., Савченко О., Мельник О. Формування листових матеріалів з вуглецевих сталей за допомогою лазерного циклічного опромінювання.....	85
Шаповал М. В., Михайлик В. Г., Криворот А. І. Аналіз конструкції гідроприводного розчинонасоса з різними комбінованими компенсаторами.....	98
Шваб С. Л., Ворон М. М., Тимошенко А. М., Семенко А. Ю., Скоробагатько Ю. П., Смірнов О. М. Особливості структуро- та фазоутворень у зварних з'єднаннях високомарганцевої сталі Fe-28Mn-11Al-1.2C, отриманих за допомогою присадного дроту Св-08Г2С-О.....	109
Вовк О. В. Підвищення ефективності шліфування плоских поверхонь шляхом регулювання температури різання.....	119

РОЗДІЛ ІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Самойленко О. В., Беляєва А. Ю., Бородій Ю. П. Використання цифрових інструментів для засвідчення об'єктів права інтелектуальної власності.....	125
Жданова О. Г., Рибачук Л. В., Рябчун В. С., Малирчук Т. В. Задача максимізації зваженої кількості об'єктів, обстежених дроном.....	134
Журко Д. О., Білоус І. В. Використання моделей вкладання слів в обробці природної мови.....	151
Зінченко П. В., Мехед Д. Б. Оптимізація запитів GraphQL.....	161
Підлісний Ю. І. Аудит мереж інтернету речей: оцінка вразливостей та захист від кібернападів.....	170
Zlobin M., Bazylevych V. Systematic review of deep and machine learning for financial modeling... ..	184
Masol A. The strategy for developing a recommendation system based on big data analytics in e-commerce.....	196
Velihorskyi B., Baida V., Khomenko M. Practical aspects for creating user interface of remote electronics laboratory.....	206

РОЗДІЛ ІІІ. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Філінська Т. Г., Філінська А. О. Емульсії пікєрінга. Перспективи використання в майонезному виробництві.....	218
---	-----

Буяльська Н. П., Денисова Н. М., Кузін А. О. Зниження впливу шкідливих антропогенних факторів на людину шляхом розробки раціону харчування в умовах забруднення ґрунту відходами війни 231

Zamay Zh., Ignatenko A., Ivanenko K. Physico-chemical and microbiological quality indicators of fermented walnut milk-based drink..... 243

Губа С. О., Болгова Н. В., Демидова Є. В., Губа О. О. Розробка рецептури суміші для протеїнового коктейлю з підвищеною біологічною цінністю. 255

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

Денисов Ю. О., Єрмолов С. В. Шляхи підвищення ефективності БПЛА мультироторного типу в сільському господарстві. 266

Шоповал С. П., Мисак С. Й. Теплова ефективність гібридного фотоелектричного геліоколектора для енергоефективних систем енергопостачання..... 278

Шинкаренко В. Ф., Шиманська А. А., Котлярова В. В. Принцип інверсії в структурній організації і еволюції електромеханічних перетворювачів енергії 291

Стрункін Г. М. Обмежувач напруги для тягових підстанцій міського електротранспорту 307

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

Боровий В. О., Браславська О. В., Рожі Т. А. Супутникове та БПЛА-знімання як інструменти моніторингу земельних ресурсів: сучасні технології та їх застосування в Україні. 315

Зацерковний В. І., Ніколюк І. Р. Використання БПЛА для виявлення вибухонебезпечних предметів та побудови карт при гуманітарному розмінуванні..... 328

Горюн О. О. Особливості розповсюдження просочувальних рідин у процесі імпульсного імпрегнування бетону. 346

Зуска А. В., Янкін О. Є., Чайка Т. М. Вплив роздільної здатності матриць цифрових фотокамер на точність топографічного зображення..... 355

Гамаюн І. В., Пілічева М. О. Аналіз можливості застосування даних з відкритих джерел для формування бази геопросторових даних територіальної громади. 365

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ 377

CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE AND MACHINE BUILDING

Bolotov G., Bolotov M., Grechka V., Ososok M. Design features of devices for diffusion welding in a glow discharge	9
Haponova O., Tarelnyk V., Tarelnyk N., Laponog G., Torhachov D. Increasing the hydroabrasive wear resistance of surfaces by combined methods based on electrospark alloying and laser treatment	22
Zenkin M., Shvedchenko O. The influence of design features of mechanical drives of roll-wrap printing machines on the accuracy of color registration	32
Rehei I., Knysh O., Knysh R., Ternovyi A., Romanchuk I. Analytical assessment of the linear displacement of the center of mass of the pressure segment during the die-cutting process of cardboard packaging blanks	42
Sakhno Ye. Modeling of working processes of a modernized hydrostatic bearing using elements of graph theory	50
Vasyliiev O., Yakovenko A. Determination of kinetic energy of vibrating machine VP-10.....	59
Verba I., Danylenko O. Restoration of machine tool production as a prerequisite for industry development in Ukraine	69
Kaglyak O., Kozyrev O., Klychynkov Yu., Levko K., Savchenko O., Melnyk O. Laser forming of carbon steel sheets by cycled laser irradiation	85
Shapoval M., Mykhaylik V., Kryvorot A. Analysis of the Design of a Hydraulic Mortar Pump with Various Combined Compensators.....	98
Schwab S., Voron M., Tymoshenko A., Semenko A., Skorobagatko Yu., Smirnov O. Features of the structure and phase formation of welded joints of high-manganese steel Fe-28Mn-11Al-1.2C obtained by Sv-08G2S-O filler wire.....	109
Vovk O. Increasing the efficiency of grinding flat surfaces by adjusting the cutting temperature.....	119

SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

Samoilenko O., Bieliaieva A., Borodii Yu. Using digital technologies to certify intellectual property rights	125
Zhdanova O., Rybachuk L., Riabchun V., Maliarchuk T. The problem of maximizing the weighted number of objects surveyed by the drone	134
Zhurko D., Bilous I. Using word embedding models in natural language processing	151
Zinchenko P., Mekhed D. Optimization of GraphQL queries	161
Pidlisnyi Yu. Audit of IoT networks: assessing vulnerabilities and protecting against cyber attacks	170
Zlobin M., Bazylevych V. Systematic review of deep and machine learning for financial modeling.....	184
Masol A. The strategy for developing a recommendation system based on big data analytics in e-commerce	196
Velihorskyi B., Baida V., Khomenko M. Practical aspects for creating user interface of remote electronics laboratory.....	206

SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

Filinska T., Filinska A. Pickering emulsions. Prospects of use in mayonnaise production.....	218
Buialska N., Denisova N., Kuzin A. Reducing the influence of harmful anthropogenic factors on a human by developing a diet in the case of soil contaminated by war waste	231
Zamay Zh., Ignatenko A., Ivanenko K. Physico-chemical and microbiological quality indicators of fermented walnut milk-based drink.....	243

Huba S., Bolhova N., Demydova Ye., Huba O. Development of the recipe for protein cocktail with increased biological value	255
--	-----

SECTION IV. ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

Denisov Yu., Yermolov S. Ways to increase the activity of multi-rotor UAVs in agriculture	266
Shapoval S., Mysak S. Thermal efficiency of a hybrid photovoltaic solar collector for energy-efficient power supply systems.....	278
Shynkarenko V., Shymanska A., Kotliarova V. The inversion principle in the structural organization and evolution of electromechanical energy converters	291
Strunkin H. Voltage limiter for urban electric transport traction substations.....	307

SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

Borovyi V., Braslavska O., Rozhi T. Satellite and UAV surveying as tools for monitoring land resources: modern technologies and their application in Ukraine.....	315
Zatserkovnyi V., Nikoliuk Igor. Using UAVs to detect explosives and create maps in humanitarian demining.....	328
Horiun O. Features of distribution of impregnating liquids in the process of impulse impregnation of concrete.....	346
Zuska A., Yankin O., Chaika T. Influence of the resolution capacity of digital camera matrices on topographic image accuracy	355
Gamayun I., Pilicheva M. Analysis of potential for utilizing open source data in developing the geospatial database for territorial communities	365

BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES.....	377
---	------------

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2025-1(39)-9-21

УДК 621.791.11

**Геннадій Павлович Болотов¹, Максим Геннадійович Болотов²,
Владислав Володимирович Гречка³, Максим Олегович Ососок⁴**

¹доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: bolotovgp@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>

ResearcherID: [H-5304-2014](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917), **Scopus Author ID:** [6506157907](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917)

²кандидат технічних наук, доцент, кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: bolotovmg@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>

ResearcherID: [H-4183-2014](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132), **Scopus Author ID:** [57190377278](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132)

³аспірант кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: deadsilence166@gmail.com

⁴здобувач вищої освіти, кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: ososokmaksim@gmail.com

КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ УСТАНОВОК ДЛЯ ДИФУЗІЙНОГО ЗВАРЮВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

Розглянуто технічні та технологічні особливості тліючого розряду як перспективного високотехнологічного та економічного джерела енергії для процесів дифузійного зварювання, що отримують даним часом значного поширення. Розглянута будова установок дифузійного зварювання у тліючому розряді. Наведено основні складові механічного та енергетичного комплексів установок. Сформульовано основні технічні вимоги до окремих вузлів установок та наведені практичні приклади їх виконання, що допоможе фахівцям у проектуванні та виготовленні відповідного обладнання.

Ключові слова: дифузійне зварювання; тліючий розряд; установки тліючого розряду; газорозрядна плазма.

Рис.: 8. Табл.: 1. Бібл.: 32.

Постановка проблеми. Для отримання прецизійних з'єднань з різномірних матеріалів у промисловості здебільшого застосовують дифузійне зварювання, яке здійснюється тиском у твердому стані при температурах нижче температури плавлення з'єднуваних матеріалів [1-3]. Відсутність розплавлення дозволяє подолати бар'єр металургійної несумісності для багатьох металевих композицій і забезпечити їх зварювання. Відносно невисокі значення температур нагріву та зусиль стискання деталей не призводять до їх деформації та зміни властивостей металу в зоні з'єднання, що підвищує якість і термін експлуатації зварних вузлів [4; 5].

Особливості технологічного процесу дифузійного зварювання визначають і особливості конструкції установок, за допомогою яких здійснюється цей процес.

Зварювальні дифузійні установки зазвичай складаються з таких основних вузлів:

- вакуумна система для отримання вакууму в камері, де здійснюється зварювання;
- система створення тиску на зварювані деталі;
- джерело енергії для нагріву зварюваних деталей;
- нагрівальний елемент (вузол).

На практиці конструкція установок може відрізнятися відповідно до їх призначення (універсальні чи спеціалізовані) та способу нагріву деталей, що зварюються [6-13]. У наш час у дифузійному зварюванні знайшли застосування індукційний (високочастотний), радіаційний нагрів та нагрів у низькотемпературній плазмі тліючого розряду [14-16]. Перші

два способи в силу своїх технологічних особливостей потребують для здійснення зварювання глибокого вакууму (порядку $10^{-2} \dots 10^{-4}$ Па) і, відповідно, наявності у складі установок конструктивно складних і вартісних систем вакуумування [17].

Розроблений пізніше спосіб дифузійного зварювання у тліючому розряді виявився суттєво більш технологічним та економічним, оскільки перетворення електричної енергії в теплову в цьому випадку здійснюється безпосередньо на поверхні деталей, що зварюються, тобто реалізується прямий нагрів із високою термічною ефективністю [18].

Зварювання у тліючому розряді здійснюється в розрідженому газовому середовищі при тиску захисного газу в робочій камері $0,01 \dots 15$ кПа, що дозволяє суттєво спростити конструкцію вакуумної системи і установки загалом.

Наведені особливості зварювання в тліючому розряді дозволили, у порівнянні, зокрема, з індукційним нагрівом, знизити витрати електроенергії у $6 \dots 8$ разів, а вартість устаткування – у $4 \dots 5$ разів [19].

Як уже зазначалось, дифузійне зварювання, внаслідок своїх особливостей, ефективно застосовується для отримання прецизійних з'єднань з різнорідних матеріалів у відповідальних виробках багатьох галузей промисловості. Номенклатура таких виробів надзвичайно широка, а обсяг їх виробництва коливається від одиничного до серійного [20; 21]. Тому нині устаткування для дифузійного зварювання промисловістю серійно не випускається. Окремі галузі, а у багатьох випадках і окремі підприємства та наукові організації створюють обладнання для дифузійного зварювання, виходячи з власних задач і максимально застосовуючи при цьому існуючі технічні рішення. Зокрема, для будови установок для дифузійного зварювання з індукційним та радіаційним нагрівом, які потребують глибокого вакууму, за основу приймають вакуумні пости установок вакуумного напилення (УВН) та розпилення (УРМ) матеріалів. Як джерело енергії застосовують стандартні генератори високої частоти та силові понижуючі трансформатори необхідної потужності. Самостійній розробці підлягає переважно внутрішньокамерне обладнання, яке визначається характеристиками зварюваних деталей та способом їх нагріву.

Аналогічно і при проектуванні установок для дифузійного зварювання у тліючому розряді перед розробниками постає задача вибору оптимальних конструкторських рішень, які б максимально мірою задовольняли потребам виробництва. Однак у такому випадку ця задача суттєво ускладнюється, оскільки значна кількість елементів установки, передусім тих, що стосуються джерела живлення тліючого розряду, є нестандартними і підлягають самостійній розробці.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням створення та вдосконалення обладнання для дифузійного зварювання, як доволі складного та прецизійного, приділяється значна увага з моменту його розробки. У роботах [13; 15] сформульовані основні принципи побудови зварювальних установок із індукційним та радіаційним способами нагріву. У роботах [22; 23] наведено конструктивні схеми та методики розрахунку основних елементів енергетичної системи установок.

У роботі [24] охарактеризовані результати досліджень технологічних властивостей тліючого розряду в умовах зварювання та сформульовані основні підходи та технічні умови до створення відповідного устаткування. Основна увага у більшості публікацій, що розглядають питання технічної реалізації способу зварювання у тліючому розряді, також приділяється вдосконаленню енергетичного комплексу обладнання, насамперед джерела живлення розряду, способам його регулювання та забезпечення стабільного горіння.

У роботі [25] запропонована оригінальна схема трансформатора системи живлення тліючого розряду, який надає на виході форму кривої напруги, що забезпечує стабільне запалювання розряду на початку кожного напівперіода та підтримує його стабільне горіння протягом напівперіода. Однак, складність конструкції магнітної системи трансформатора, особливо в умовах їх одиничного виготовлення, робить їх застосування нерентабельним.

Особливістю застосування тліючого розряду як джерела нагріву для дифузійного зварювання, в умовах підвищених тисків газу та значних струмів, є імовірність появи нестабільності його горіння, що проявляється у вигляді короткочасних або тривалих переходів тліючого розряду в електричну дугу, яка може призводити до оплавлення зварюваних деталей. У роботах [26; 27] розглянуто основні флуктуаційні процеси в розряді, що сприяють утворенню таких нестабільностей. У роботі [28] показано, що для підвищення стабільності тліючого розряду у його зовнішнє коло необхідно вмикати баластний опір. Без такого опору тліючий розряд завжди нестійкий і достатньо легко переходить у дуговий. Із збільшенням величини такого опору стабільність тліючого розряду зростає, однак, надмірне його підвищення призводить до зниження енергетичної ефективності нагріву внаслідок зростання втрат на цьому опорі. У роботі [29] наведена методика визначення величини такого зовнішнього баластного опору, що вмикається у коло живлення тліючого розряду. Показано, що оптимальна величина цього опору складає 0,5...0,8 від величини опору самого розряду.

Виділення нерозкритих частин загальної проблеми. Якщо до проектування та будови установок для дифузійного зварювання з індукційним та радіаційним нагрівом вже визначені концептуальні підходи, розроблені технічні та технологічні рішення, то щодо устаткування із застосуванням тліючого розряду, як відносно нового способу зварювання, такі рекомендації на даний час в достатній мірі ще не сформовані і є розрізненими. Тому розробникам устаткування доводиться часто діяти методом спроб і помилок, що ускладнює процес створення установки і підвищує її вартість.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз фізико-технічних характеристик тліючого розряду як джерела енергії для процесів дифузійного зварювання і визначення основних конструктивних підходів до практичної реалізації цих процесів.

Виклад основного матеріалу. У технологічних процесах застосовують тліючий розряд, що горить у розрідженому газовому середовищі при тисках газу нижче за атмосферний між двома електродами, роль одного з яких – катода, виконують самі зварювані деталі. При цьому в діапазоні тисків 10...1000 Па позитивні іони робочого газу внаслідок їх обмеженої кількості можуть набувати великої швидкості і бомбардувати поверхню катода зі значною енергією, видаляючи з неї забруднення та оксидні плівки, що є необхідною умовою для процесів зварювання тиском. При тисках газу вище 3...4 кПа енергія іонів знижується, однак унаслідок значної їх кількості зростає колективний ефект бомбардування ними складної вакуумної арматури поверхні виробу, що призводить до його значного нагріву й реалізації процесу зварювання.

З наведених вище технологічних режимів видно, що установки для зварювання в тліючому розряді можуть будуватись за суттєво спрощеною схемою, без застосування складної вакуумної арматури та високовакуумних насосів, застосовуючи лише насоси попереднього розрідження (форвакуумні насоси), які забезпечують вакуум до 10^{-1} Па у робочому об'ємі. При цьому металеві вакуумпроводи можуть бути замінені шланговими, виконаними із вакуумної гуми із внутрішнім каналом діаметром 12...15 мм. Це дає змогу розташовувати форвакуумний насос не тільки у корпусі установки, а й у будь-якому зручному місці за її межами. У якості вакуумних насосів доцільно застосовувати компактні двохступеневі пластинчасто-роторні насоси серії НВР (НВР-5Д, НВР-5ДМ та ін.), які забезпечують більш високу продуктивність, ніж пластинчасто-статорні та золотникові насоси, і мають значно менший рівень шуму, ніж двохроторні насоси Рутса.

Система стискання деталей установок тліючого розряду принципово не відрізняється від аналогічних систем установок з індукційним та радіаційним нагрівом. Тип системи стискання обирається в залежності від площі зварного контакту деталей і, відповідно, необхідного зусилля стискання. При зусиллях до 1 кН доцільно обирати просту механічну (важільну) або електромеханічну систему, до 10 кН – електромеханічну систему із приводом постійного струму, яка забезпечує плавне прикладання навантаження, а при зусиллях вище 10 кН – гідравлічну систему, оскільки габарити електромеханічної системи в цих умовах суттєво зростають.

Більш помітно на будову установок дифузійного зварювання впливає спосіб нагріву, який визначає конструкцію внутрішньокамерного нагрівального пристрою, джерела його живлення та засобів керування процесом нагріву. Зокрема, при застосуванні в установках у якості джерела енергії високочастотних лампових генераторів або силових трансформаторів регулювання режиму нагріву здійснюється за допомогою одного параметру – анодного струму ламп генератора або напруги холостого ходу трансформатора, яким задається тільки повна потужність нагріву. Це суттєво обмежує їх технологічні властивості.

Тліючий розряд, як джерело нагріву навпаки є багатофакторним об'єктом регулювання. Основними параметрами нагріву тліючим розрядом (іонного нагріву) є струм розряду, напруга на електродах, міжелектродна відстань та тиск газу в робочій камері. Такий широкий спектр керуючих дій дозволяє задавати не тільки повну, а й питому потужність нагріву, корегувати форму і площу зони нагріву та розподіл енергії в ній. Це суттєво розширює технологічні можливості тліючого розряду, до яких можна віднести [30]:

- 1) можливість роздільно регулювати струм і напругу на розряді, тобто окремо змінювати як кількість електричних зарядів, що бомбардують катод, так і їхню енергію.
- 2) можливість при низьких струмах і високій напрузі на розряді здійснювати попереднє іонне очищення зварюваних поверхонь деталей, а при значних струмах і пониженій напрузі здійснювати їх ефективний нагрів.
- 3) можливість плавного регулювання площі зони нагріву (катодної плями розряду S_n) та густини енергії (q_n) у ній зміною величини струму розряду (I_p) та тиску газу (P) у робочій камері. Ця можливість проілюстрована на рис.1.

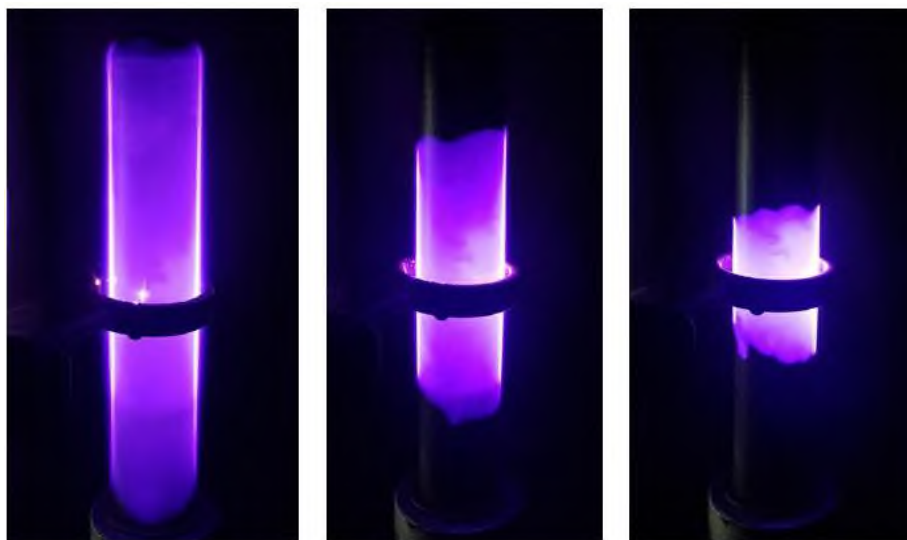


Рис. 1. Характер розподілу плями нагріву циліндричного катода (30×160 мм) нормальним тліючим розрядом зі збільшенням розрядного струму та тиску газу в робочій камері [27]

4) можливість регулювання в широких межах напруги на розряді як зміною тиску газу у робочому об'ємі, так і зміною величини міжелектродного проміжку. На рис. 2 наведений орієнтовний діапазон цих регулювань для основних газів, що застосовуються при дифузійному зварюванні.

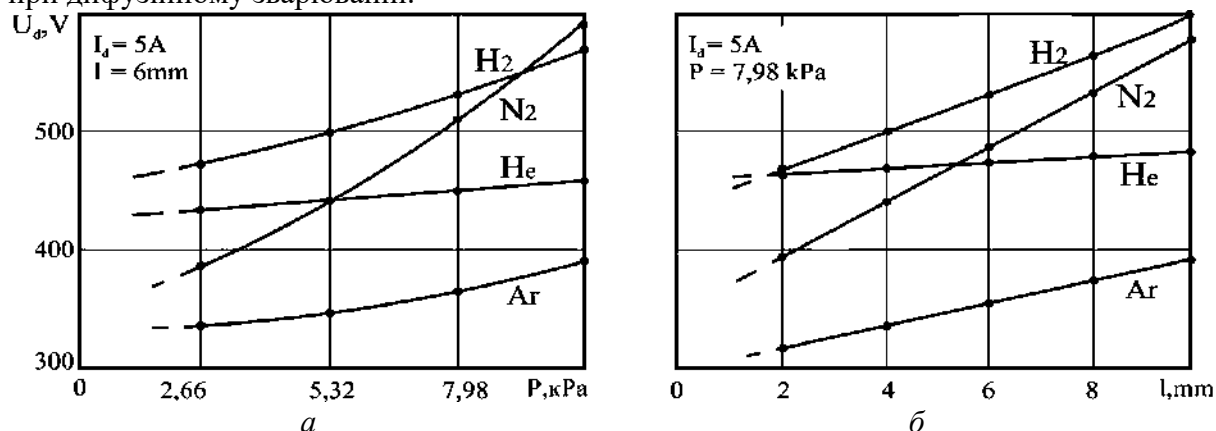


Рис. 2. Залежність напруги на тліючому розряді від тиску газу (а) та її припущення при зміні міжелектродного проміжку (б) для ряду газів [28]

5) можливість регулювання процесу нагріву зміною величини і форми міжелектродного проміжку. Густина струму на катоді тліючого розряду має нормальну форму розподілу. Максимум її знаходиться в точках, найбільш близьких до анода. Тому анод повинен розташовуватись еквідистантно відносно поверхні нагріву, якщо міжелектродна відстань набагато менша, ніж характерний розмір зварюваного перерізу (рис. 3, а).

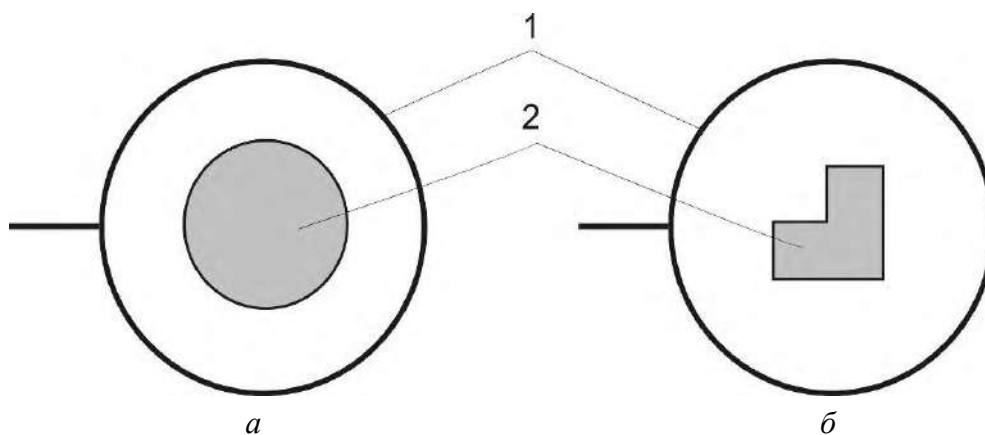


Рис. 3. Схеми нагріву деталей:
а – циліндричного перерізу; б – складного перерізу

Змінюючи форму анода можливо регулювати характер прогріву всього перерізу деталей, запобігаючи перегріву кутів та виступів. У тих випадках, коли міжелектродна відстань порівняна з розмірами перерізу деталей, залежність між формою анода і катода зменшується або зникає зовсім. Тоді можливо застосовувати аноди простої форми для нагріву тліючим розрядом складних перерізів (рис. 3, б). Така взаємозалежність форм анода та катода є важливою технологічною властивістю тліючого розряду, що забезпечує його адаптивність в умовах широкої номенклатури виробництва.

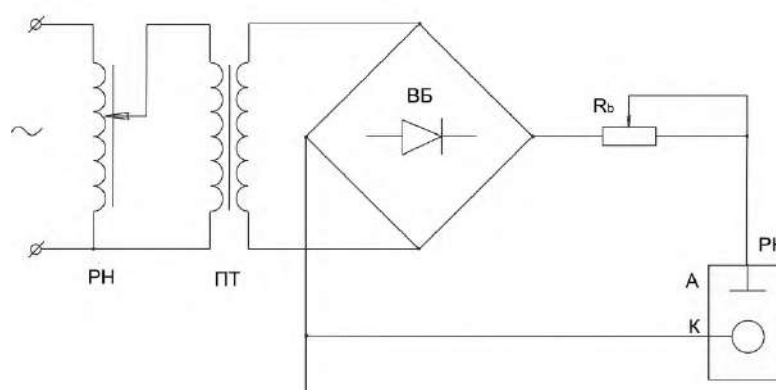


Рис. 4. Принципова електрична схема енергетичної системи установки зварювання у тліючому розряді: РН – регулятор напруги; ПТ – підвищувальний трансформатор; ВБ – блок випрямлення змінного струму; R_b – баластний реостат (регулятор струму); РК – розрядна камера; А – анод; К – катод (зварювані деталі) [25]

Для забезпечення перелічених технологічних можливостей енергетичний комплекс установок дифузійного зварювання в тліючому розряді, схема якого наведена на рис. 4, повинен включати:

– **регулятор напруги** РН, який вмикається, як правило, на вході схеми у первинній обмотці підвищувального трансформатора і повинен забезпечувати плавне регулювання. Найбільш ефективним типом такого регулятора слід вважати автотрансформатор, який забезпечує неперервне амплітудне регулювання без зміни форми синусоїди вхідної напруги. Сучасні тиристорні регулятори напруги, побудовані за принципом фазо-імпульсного регулювання, мають значно менші габарити і вагу, однак суттєво спотворюють форму вхідної напруги, призводячи до появи у електричному колі небажаних гармонік, які негативно впливають на роботу підвищувального трансформатора.

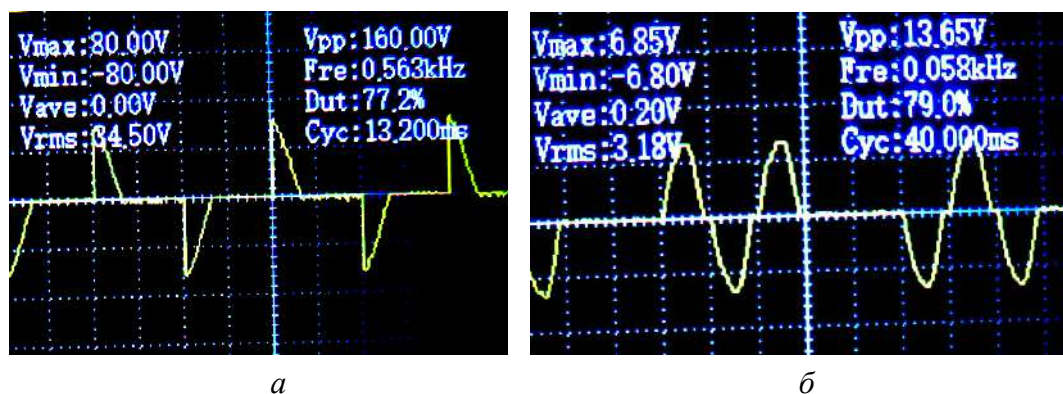


Рис. 5. Осцилограми регулювання напруги на вході джерела живлення тліючого розряду фазо-імпульсним (а) та число-імпульсним (б) тиристорними регуляторами

Тиристорні регулятори із число-імпульсним принципом регулювання не мають такого недоліку, однак, при їх застосуванні на малій потужності у електричному колі живлення розряду з'являються значні за тривалістю паузи струму (рис. 5), що призводить до нестабільності горіння тліючого розряду із можливістю його згасання.

Одним з можливих варіантів регулятора напруги для установок тліючого розряду можна вважати вмикання фазо-імпульсного регулятора у коло вторинної обмотки підвищувального трансформатора. Однак, у даному випадку необхідно застосовувати у регуляторі тиристори не нижче 14...16-го класів за напругою.

– *підвищувальний трансформатор* може виконуватись як на броньовому, так і на стержньовому типах магнітопроводу, і повинен забезпечувати на виході напругу холостого ходу 800...1000 В. Для зменшення втрат і підвищення коефіцієнта потужності вторинну обмотку трансформатора доцільно розташовувати безпосередньо поверх первинної із мінімальним повітряним зазором.

– *регулятор струму*, у якості якого використовують баластний реостат, який водночас виконує роль стабілізуючого зовнішнього опору, величина якого змінюється ступінчасто в межах 30...100 Ом. Відповідно, ступінчасто змінюються струм і потужність розряду.

– *анод*, положення якого відносно зварного виробу (катода) впливає на напругу на розряді та його потужність. Для простих за формою виробів можуть застосовуватись монолітні контурні аноди (рис. 6), виготовлені із сталевого дроту, або сталевий чи молибденовий стрічки, які розташовують еквідистантно поверхні виробу на відстані 0,005...0,015 м. Для більш складних форм виробів рівномірність нагріву по периметру зварного контакту може бути досягнута збільшенням відстані між анодом і виробом. Однак у цьому випадку слід враховувати, що надмірне збільшення міжелектродної відстані (на практиці більше 0,025...0,03 м) призводить до зниження ефективності нагріву виробу внаслідок одночасного нагріву значних об'ємів навколишнього газу. Для виробів складної форми ефективним є застосування секціонованих анодів (рис. 6, б), окремі секції яких виконуються рухомими і можуть встановлюватись еквідистантно поверхні виробу на оптимальній відстані. Кількість секцій може визначатись особливостями форми виробу. Окремі секції аноду через баластні опори величиною 50...150 Ом з'єднуються із позитивним виводом блоку спрямлення струму.



а



б

Рис. 6. Форми анодів тліючого розряду:

а – монолітні; б – секціоновані

– *електропневмоклапани або вентилі* (при ручному регулюванні) забезпечують вмикання подачі газу або його відкачування з робочої камери. Зміна величини тиску газу впливає на густину струму у зоні нагріву і, відповідно, на термічний цикл зварювання.

– *контрольно-вимірювальна апаратура* забезпечує контроль та реєстрацію основних параметрів процесу зварювання. Електричні параметри тліючого розряду вимірюються відповідними стандартними вимірювальними приладами. Значна увага повинна приділятися контролю головного параметру дифузійного зварювання – температури в зоні контакту зварюваних деталей, що у визначальній мірі забезпечує якість зварного з'єднання.

У дифузійному зварюванні, в основному, застосовують контактний метод контролю температурного стану в зоні з'єднання за допомогою термоелектричних перетворювачів (термопар), які закріплюються на боковій поверхні зварюваних деталей із надійним контактом між ними. Однак, при зварюванні у тліючому розряді цей метод може застосовуватись

обмежено, Викликано це тим, що робочий спай термопари розташовується в безпосередній близькості від зони контакту деталей, де у тліючому розряді спостерігається найвища густина струму і, відповідно, найбільша густина теплової енергії, що може призводити до перегрівання і оплавлення тонких дрітів термопари. Крім того, термопара локально порушує рельєф поверхні виробу, що призводить до викривлення ліній електростатичного поля у цій зоні і сприяє виникненню електричної дуги, яка спалює термопару.

Більш ефективним при зварюванні у тліючому розряді є застосування безконтактних методів контролю температури за допомогою оптичних або фотоелектричних пірометрів, які забезпечують реєстрацію електромагнітного випромінювання у інфрачервоному та оптичному діапазоні спектру. Однак, слід мати на увазі, що оптичні пірометри (зокрема, типів ОППР-09, ОППР-017) забезпечують вимірювання температури не нижче 1073 К, що обмежує їх використання при зварюванні багатьох металів та сплавів (алюміній, мідь, латунь та ін.). Найбільш доцільним методом контролю температур при зварюванні у тліючому розряді є застосування фотоелектричних мікропірометрів (наприклад, типу ФЕП-4), які мають широкий діапазон вимірювань – від 573 до 2473 К і забезпечують високу точність вимірювання на відстані до 1 м на досить обмеженій площі поверхні виробу.

Контроль пірометрами здійснюється через вікна у вакуумній камері. При цьому слід враховувати імовірність їх забруднення в процесі роботи, зокрема в результаті катодного розпилення, та погіршення їх прозорості, що може привести до похибки вимірювання. Це вимагає очищення скла вікон після кожного циклу зварювання та періодичної їх заміни.

З урахуванням перелічених вузлів загальна схема установки дифузійного зварювання у тліючому розряді, що включає як механічний, так і енергетичний комплекси, має вигляд, наведений на рис. 7.

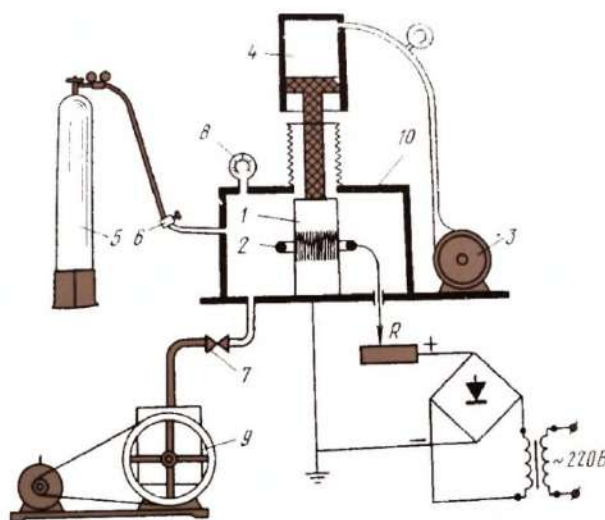


Рис. 7. Схема установки для дифузійного зварювання у тліючому розряді:
1 – зварювані деталі; 2 – анод; 3 – гідронасос; 4 – гідроциліндр системи стискання деталей; 5 – балон із робочим газом; 6, 7 – вентиля; 8 – вакууметр;
9 – вакуумний насос; 10 – вакуумна камера [16]

Практичні схеми установок можуть доповнюватись окремою малопотужною системою іонного очищення зварюваних поверхонь деталей, електрична схема якої аналогічна схемі, наведеній на рис. 4, а також, системами стабілізації горіння тліючого розряду та запобігання виникнення у ньому електричних дуг [31], які можуть призвести до руйнування деталей.

У таблиці нижче наведені межі зміни основних параметрів, що характеризують процеси дифузійного зварювання в тліючому розряді, досягнуті на існуючому обладнанні.

Таблиця 1 – Основні параметри дифузійного зварювання в тліючому розряді

№ п/п	Параметр і його розмірність	Межі регулювання параметра
1	Сила струму, А	$10^{-3} \dots 10^2$
2	Напруга на аноді, В	0 ... 1000
3	Тиск газу в робочій камері, кПа	$10^{-2} \dots 10^2$
4	Питоме зусилля стиснення деталей, МПа	0 ... 100
5	Максимальна температура нагріву деталей, К	1500...2000
6	Густина струму на катоді, А/см ²	$10^{-3} \dots 1$
7	Міжелектродна відстань, м	0,005...0,05

На рис. 8 представлені деякі з діючих на даний час установок для дифузійного зварювання у тліючому розряді, що застосовуються в різних галузях промисловості.

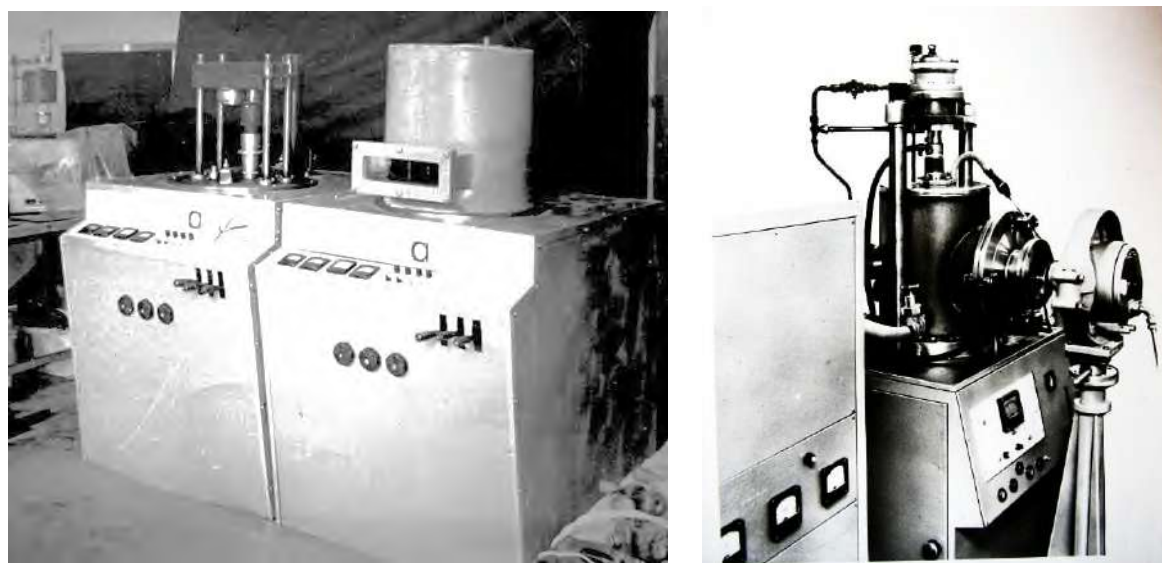


Рис. 8. Зовнішній вигляд установок для дифузійного зварювання у тліючому розряді:
 а – установка ЮН-30 для зварювання магнітострикційних перетворювачів;
 б – установка ЮН-8 для зварювання твердосплавних штампів, оснащена фотоелектричним пірометром [32]

Висновки. На підставі аналізу фізико-технічних характеристик та технологічних особливостей тліючого розряду як ефективного і перспективного джерела енергії для дифузійного зварювання, визначені основні складові установок для реалізації цього способу, сформульовані технічні вимоги до елементів устаткування та наведені практичні рекомендації по їх вибору та проектуванню.

Список використаних джерел

1. Казаков, Н. (1981). *Диффузионная сварка материалов* (Н. Казаков, Ред.). Машиностроение.
2. John, B., Letsch, H., Wölck, J., Hess, M., & Hensel, J. (2023). Process technology for diffusion welding with cyclically pulsative joining forces. *Metals*, 13(3), 547. <https://doi.org/10.3390/met13030547>.
3. Kolukisa, S. (2007). The effect of the welding temperature on the weldability in diffusion welding of martensitic (AISI 420) stainless steel with ductile (spheroidal graphite-nodular) cast iron. *Journal of Materials Processing Technology*, 186(1-3), 33–36. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.148>.
4. Yuan, X. J., Sheng, G. M., Qin, B., Huang, W. Z., & Zhou, B. (2008). Impulse pressuring diffusion bonding of titanium alloy to stainless steel. *Materials Characterization*, 59(7), 930–936. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.08.003>.
5. Yang, Y., Liu, X., & Wang, S. (2020). Thermal characteristics of induction heating with stepped diameter mold during two-phase zone continuous casting high-strength aluminum alloys. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152, 119479. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119479>.

6. Бачина, В. (1991). *Теория, технология и оборудование диффузионной сварки* (В. Бачина, Ред.). Машиностроение.
7. Lin Shuyi, Li Hui. (1996). Manufacture process and equipment for welded stainless steel pipes. *Steel pipe*, 25(1), 4-5.
8. Bao Tailai, Zhu Xin, & Wang Xinju. (1995). Automatic measuring/control of technological data for hi-frequency welding process. *Steel pipe*, 24(6), 46-51.
9. Ravi, B., Kumar, G. Raja, Rambabu K. & Narendar, D. Dec. (2021) Optimization of a Diffusion Welding System Using the TRIZ Methodology. *Indo-American Journal of Mechanical Engineering*, 10(4), 120-124. <https://iajme.com/index.php/iajme/article/view/55>.
10. Avagyan, V. S., Tounyan, I. V., & Erevanskij Fizicheskij Inst., Erevan (Armenia). (1992). Vacuum set-up overall size for diffusion welding and soldering of copper pieces.
11. Розанов, Д. (1982). *Вакуумная техника*. Высшая школа.
12. Каменев, В. (1987). Состояние и перспективы развития систем откачки. У *Достижения и перспективы развития диффузионной сварки* (с. 76–77).
13. Авагян, В., & Антонов, В. (1990). Установка диффузионной сварки в вакууме. У *Достижения и перспективы развития диффузионной сварки* (с. 74–75). МДНТП.
14. Haufler, G., & Mayer, H. (1975). Set-up and operational experience with a new diffusion welding equipment. *Deutscher Verlag fuer Schweisstechnik*, (38), 101–105.
15. Слухоцкий, А. (1981). *Установки индукционного нагрева* (А. Слухоцкий, Ред.). Энергоиздат.
16. Котельников, Д. И. (1981). *Сварка давлением в тлеющем разряде*. Металлургия.
17. Уэймаус, Д. (1977). *Газоразрядные лампы*. Энергия.
18. Staack, D., Farouk, B., Gutsol, A., & Fridman, A. (2008). DC normal glow discharges in atmospheric pressure atomic and molecular gases. *Plasma Sources Science and Technology*, 17(2), 025013. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/17/2/025013>
19. Ecker, G., Kröll, W., & Zöllner, O. (1964). Thermal instability of the plasma column. *Physics of Fluids*, 7(12), 2001. <https://doi.org/10.1063/1.1711110>.
20. Lavrishchev, A. V., Prokopenko, S. V., Tynchenko, V. S., Myrugin, A. V., Kukartsev, V. V., Bashmur, K. A., Sergienko, R. B., Tynchenko, V. V., & Lysyannikov, A. V. (2021). Investigation of the solid-phase joint of VT-14 titanium alloy with 12KH18N10T stainless steel obtained by diffusion welding through intermediate layers. *Metals*, 11(8), 1325. <https://doi.org/10.3390/met11081325>.
21. Lyushinsky, A. V. (2009). Diffusion Welding of Tungsten, Molybdenum, Titanium and Copper to each other through Intermediate Layers. *Weld. Diagn*, 4, 42–44.
22. Данилов, В.В. (1999). Установка диффузионной термокомпрессионной сварки. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 5 (6), 28-30.
23. Азаматов, З.Т., Мамаджанов, Ф.Д., & Расулов, Х.Х. (1993). Устройство для диффузионной сварки пьезоэлектрических преобразователей акустических устройств. *ПТЭ*, 4, 213-218.
24. Болотов, М. Г. (2013). Дослідження локальних властивостей плазми тліючого розряду з порожнистим катодом стосовно до умов зварювального нагріву. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки.* – 1 (63), 112-119.
25. Bolotov, M. & Bolotov, G. (2019). Critical definition of the limits of glow discharge energy stability in welding. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2019.8879992>.
26. Болотов, М. Г. (2018). Аналіз основних нестабільностей тліючого розряду середніх тисків в умовах обробки матеріалів. *Технічні науки та технології*, 2 (12), 103-115.
27. Болотов, М.Г., & Болотов, Г. П. (2021). Визначення меж енергетичної стабільності тліючого розряду в умовах зварювального нагріву. *Технічні науки та технології*, 1(19), 009–017. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1\(19\)-9-17](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1(19)-9-17).
28. Bolotov, G., Ryzhov, R., & Bolotov, M. (2018). Stabilization of high-current glow discharge by the active (ballast) resistor while the precision welding. *Mechanics and Advanced Technologies*, 83(2). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.83.124415>.

29. Bolotov, H. P., Ryzhov, R. M., & Bolotov, M. H. (2019). Increasing of glow discharge stability in welding by means of multisectional electrode systems. *KPI Science News*, (2), 57–63. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.2.167770>.

30. Недоспасов, А. В., Хайт, В. Д. (1979). *Колебания и неустойчивости низкотемпературной плазмы*. Наука.

31. Напартович, А. П., Наумов, В. Г., & Шашков, В. М. (1975). О распаде плазмы тлеющего разряда в постоянном электрическом поле. *Физика плазмы*, 1(5), 821–829.

32. Болотов, М. Г., Прибитько, І. О., & Нагорна, І. В. (2020). Тліючий розряд як джерело поверхневого нагріву в процесах з'єднання різномірних матеріалів (огляд). *Технічні науки та технології*, (2(20)), 22–36. <http://tst.stu.cn.ua/article/view/215560/215683>.

References

1. Kazakov, N.F. (Ed.). (1981). *Dyffuzyonnaia svarka materyalov [Diffusion welding of materials]*. Mashynostroenye.

2. John, B., Letsch, H., Wölck, J., Hess, M., Hensel, J. (2023). Process Technology for Diffusion Welding with Cyclically Pulsative Joining Forces. *Metals*, 13, 547. <https://doi.org/10.3390/met13030547>.

3. Kolukisa, S. (2007). The effect of the welding temperature on the weldability in diffusion welding of martensitic (AISI 420) stainless steel with ductile (spheroidal graphite-nodular) cast iron. *J. Mater. Process. Technol.*, 186, 33–36.

4. Yuan, X.J., Sheng, G.M., Qin, B., Zhou, W.Z.H.B. (2008). Impulse pressuring diffusion bonding of titanium alloy to stainless steel. *Mater. Charact.*, 59, 930–936.

5. Yang, Y., Wang, X.L.S. (2020). Thermal characteristics of induction heating with stepped diameter mold during two-phase zone continuous casting high-strength aluminum alloys. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 152, 119479. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119479>.

6. Bachyn, V.A. (Ed.). (1991). *Teoriya, tekhnolohiya y oborudovanye dyffuzyonnoi svarky [Theory, technology and equipment of diffusion welding]*. Mashynostroenye.

7. Lin Shuyi, Li Hui. (1996). Manufacture process and equipmfmt for welded stainless steel pipes. *Steel pipe*, 25(1), 4-5.

8. Bao Tailai, Zhu Xin, Wang Xinju. (1995). Automatic measuring/control of technological data for hi-frequency welding process. *Steel pipe*, 24(6), 46-51.

9. Ravi, B., Kumar, G. Raja, Rambabu, K., and Narendar, D. (2021). Optimization of a Diffusion Welding System Using the TRIZ Methodology. *Ind-Am. J Mech. Eng.*, 10(4), 120–124.

10. Avagyan, V.S., Tounyany, I.V. (1992). Erevanskij Fizicheskij Inst., Erevan (Armenia), «Vacuum set-up overall size for diffusion welding and soldering of copper pieces».

11. Rozanov, D.N. (1982). *Vakuumnaia tekhnika [Vacuum technique]*. Vysshaya shkola.

12. Kamenev, V.N. (1987). Sostoianie y perspektivy razvitiia sistem otkachki. Tezisy dokladov [The state and prospects of the development of pumping systems. Thesis of reports]. *XII Vsesoiuznaia nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Dostizheniya i perspektivy razvitiya dyffuzyonnoi svarky" – MDNTP – XII All-Union scientific and technical conference "Achievements in perspective of development of diffusion welding"* (pp. 76-77).

13. Avahian, V.Sh., Antonov, V.P. *Ustanovka dyffuzyonnoi svarky v vakuume [Installation of diffusion welding in a vacuum]*. XIII Vsesoiuznaia nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Dostizheniya y perspektivy razvitiya dyffuzyonnoi svarky – MDNTP XII All-Union scientific and technical conference "Achievements in perspective of development of diffusion welding. (pp. 74-75).

14. Haufler, G., Mayer, H.G. (1975). Set-up and operational experience with a new diffusion welding equipment. *Deutscher Verlag fuer Schweisstechnik*, 38, 101-105.

15. Slukhotskyi, A.E. (Ed.). (1981). *Ustanovky induktsionnoho nahreva [Installations of induction heating]*. Energoizdat.

16. Kotelnikov, D.Y. (1981). *Svarka davleniem v tleishchem razriade [Pressure welding in a glow discharge]*. Metallurgy.

17. Weimaus, D. (1977). *Hazorazriadnyie lampy [Gas discharge lamps]*. Energy.

- 18.David Staack et al. (2008). DC normal glow discharges in atmospheric pressure atomic and molecular gases. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 17. DOI 10.1088/0963-0252/17/2/025013.
- 19.Ecker, G., Kroll, W., Zoller, O. (1964). Thermal Instability of the plasma column. *Phys. Fluids.*, 7(12), 2001.
- 20.Lavrishchev, A.V., Prokopev, S.V., Tynchenko, V.S., Myrugin, A.V., Kukartsev, V.V., Bashmur, K.A., Sergienko, R.B., Tynchenko, V.V., Lysyannikov, A.V. (2021). Investigation of the Solid-Phase Joint of VT-14 Titanium Alloy with 12KH18N10T Stainless Steel Obtained by Diffusion Welding through Intermediate Layers. *Metals*, 11, 1325. <https://doi.org/10.3390/met11081325>.
- 21.Lyushinsky, A.V. (2009). Diffusion Welding of Tungsten, Molybdenum, Titanium and Copper to each other through Intermediate Layers. *Weld. Diagn.*, 4, 42–44.
- 22.Danylov, V.V. (1999). Ustanovka dyffuzyonnoi termokompressyonnoi svarky [Installation of diffusion thermo-compression welding]. *Tekhnolohyia y konstruyrovanye v elektronnoi apparature – Technology and construction in electronic units*, 5(6), 28-30.
- 23.Azamatov, Z.T., Mamadzhanov, F.D., Rasulov, Kh.Kh. (1993). Ustroistvo dlia dyffuzyonnoi svarky pezoelektrycheskykh preobrazovatelei akusticheskikh ustroystv [Device for diffusion welding of piezoelectric transducers of acoustic devices]. *RTE*, (4), 213-218.
- 24.Bolotov, M.G. (2013). Doslidzhennia lokalnykh vlastyvostei plazmy tliuchoho rozriadu z porozhnystym katodom stosovno do umov zvarivannia [Investigation of local properties of hollow cathode glow discharge plasma in relation to welding heating conditions]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Journal of Chernihiv State Polytechnical University. Series: Technical Sciences*, (1(63)), 112-119.
- 25.Bolotov, M.G., Bolotov, G. P. (2019). Criterial Definition of the Limits of Glow Discharge Energy Stability in Welding. *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)* (pp. 497-501). doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879992.
- 26.Bolotov, M.G. (2018). Analiz osnovnykh nestabilnostei tliuchoho rozriadu serednikh tyskiv v umovakh obrobky materialiv [Analysis of the main instabilities of a medium-pressure glow discharge under materials processing conditions]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. – Technical sciences and technologies*, (2(12)), 103-115.
- 27.Bolotov, M.H., & Bolotov, H. P. (2021). Vyznachennia mezh enerhetychnoi stabilnosti tliuchoho rozriadu v umovakh zvarivannia [Determination of the limits of energy stability of a glow discharge under welding heating conditions]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (1(19)), 009–017. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1\(19\)-9-17](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-1(19)-9-17).
- 28.Bolotov, G.P., Ryzhov, R.M., Bolotov, M.G. (2018). Stabilizatsiia potuzhnostrumovoho tliuchoho rozriadu aktyvnym (balastnym) oporom v umovakh pretsyziinoho zvarivannia [Stabilization of high-current glow discharge by active (ballast) resistance in precision welding conditions]. *Mechanics and Advanced Technologies*, (2(83)), 94-99. <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2018.83.124415>.
- 29.Bolotov, G.P., Ryzhov, R.M., Bolotov, M.G. (2019). Pidvyshchennia stiikosti tliuchoho rozriadu v umovakh zvarivannia zastosuvanniam multyseksiinykh elektrodnykh system [Increasing the stability of the glow discharge under welding conditions by using multi-section electrode systems]. *Naukovi visti KPI: mizhnarodnyi naukovo-tekhnicnyi zhurnal. Scientific news of KPI: international and scientific journal*, (2(124)), 57–63. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.2.167770>.
- 30.Nedospasov, A.V., Khait, V.D. (1979). *Kolebaniia y neustoiichyvosti nizkotemperaturnoi plazmy [Fluctuations and instabilities of low-temperature plasma]*. Nauka.
- 31.Napartovych, A.P., Naumov, V.H., Shashkov, V.M. (1975). O raspade plazmy tleiushcheho razriada v postoiannom elektrycheskom pole [On the decay of glow discharge plasma in a constant electric field]. *Fyzyka plazmy – Physical plasma*, 1(5), 821–829.
- 32.Bolotov, M.G., Prybytko I.O., Nahorna I.V. (2020). Tliuchy rozriad yak dzherelo poverkhevoho nahrivu v protsesakh ziednannia riznoridnykh materialiv (ohliad) [Glow discharge as a source of surface heating in the processes of joining dissimilar materials (review)]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (2(20)), 22-36. DOI: 10.25140/2411-5363-2020-2(20)-22-36.

Отримано 20.03.2025

Gennady Bolotov¹, Maksym Bolotov², Vladislav Grechka³, Maksym Ososok⁴

¹Doctor in Technical Sciences, Doctor, Doctor of Department of welding technologies and Construction, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bolotovgp@mail.ua **Researcher ID:** H-5304-2014

ORCID: 0000-0003-0305-2917 **Scopus:** 6506157907

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Welding Technologies and Construction, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: bolotovmg@gmail.com **Scopus:** 57190377278

Researcher ID: H-4183-2014 **ORCID:** 0000-0002-0915-4132

³Postgraduate student, Department of Welding Technologies and Construction, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: deadsilence166@gmail.com

⁴Student, Department of Welding Technologies and Construction, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: ososokmaksim@gmail.com

DESIGN FEATURES OF DEVICES FOR DIFFUSION WELDING IN A GLOW DISCHARGE

Nowadays, to obtain precision joints from dissimilar materials, industry mainly uses diffusion welding, which is carried out by pressure in the solid state at temperatures below the melting point of the materials being joined. Currently, diffusion welding uses induction (high-frequency), radiation heating, and heating in low-temperature glow discharge plasma. The first two methods, due to their technological features, require deep vacuum for welding and, accordingly, the presence of structurally complex and expensive vacuum systems in the installations.

The later developed method of diffusion welding in a glow discharge turned out to be significantly more technological and economical, since the conversion of electrical energy into thermal energy in this case is carried out directly on the surface of the parts being welded, i.e. direct heating with high thermal efficiency is implemented.

The purpose of the work is to analyze physical and technical characteristics of the glow discharge as an energy source for diffusion welding and to determine the main design approaches to the practical implementation of these processes.

Technical and technological features of glow discharge as a promising high-tech and economical energy source for diffusion welding processes, which are currently gaining significant popularity, are considered. The structure of glow discharge diffusion welding installations is considered. The main components of the mechanical and energy complexes of the installations are given. The main technical requirements for individual installation components are formulated and practical examples of their implementation are given, which will help specialists in the design and manufacture of appropriate equipment.

Keywords: diffusion welding, glow discharge, glow discharge installations, gas discharge plasma.

Fig.: 8. Table: 1. References: 32.

**Оксана Петрівна Гапонова¹, В'ячеслав Борисович Тарельник²,
Наталія В'ячеславівна Тарельник³, Геннадій Павлович Лапоног⁴,
Дмитро Володимирович Торгачов⁵**

¹доктор технічних наук, професор,
завідувачка кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів
Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4866-0599>. **ResearcherID:** 56938828500

²доктор технічних наук, професор, професор кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування
Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)

E-mail: tarellyk@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2005-5861>. **ResearcherID:** 56436591000

³кандидат економічних наук, доцент кафедри проектування технічних систем
Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)

E-mail: natasha-tarellyk@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6304-6925>. **ResearcherID:** 57195836961

⁴аспірант кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів
Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: glaponog@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-7538-4682>

⁵студент кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів
Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: torgachovdmitriy@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ ГІДРОАБРАЗИВНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ КОМБІНОВАНИМИ МЕТОДАМИ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ І ЛАЗЕРНОГО ОБРОБЛЕННЯ

Проведені дослідження з визначення абразивної зносостійкості покриттів, отриманих на сталі 12X18H10T, методами електроіскрового легування (ЕІЛ) і комбінованою технологією – ЕІЛ, нанесення армованого металополімерного матеріалу з наступним лазерним обробленням (ЛО). Зразки після поверхневого оброблення підлягали металографічним дослідженням, визначенню розподілу мікротвердості, а також випробуванням на абразивну зносостійкість. Застосування комбінованої технології дозволило збільшити товщину покриття до 600 мкм з мікротвердістю 7,3...10,0 ГПа. При цьому абразивна зносостійкість зросла у 7,5 раза, порівняно зі зразками без покриття.

Ключові слова: електроіскрове легування; лазерне оброблення; мікроструктура; абразивна зносостійкість; покриття.

Рис.: 5. Бібл.: 22.

Актуальність теми дослідження. За оцінками вчених, близько 50 % поломок, які виникають під час експлуатації машин і механізмів, можуть бути пов'язані з абразивним зношуванням [1; 2]. Крім того, такий вид зношування також може вплинути на надійність та довговічність деталей. І сільське господарство, і гірничодобувна промисловість (видобуток і переробка корисних копалин) вимагають використання обладнання, що безпосередньо контактує з гострими твердими породами під час земляних робіт. Такі контакти призводять до пошкоджень, руйнування та втрати матеріалу, і цей процес називається абразивним зношуванням. До того ж значна кількість деталей машин, наприклад, центрифуг (машин для розділення неоднорідних систем у відцентровому полі), що знайшли широке застосування в хімічній, нафтопереробній, харчовій галузях промисловості, а також на очисних спорудах для очищення стічних вод великих міст і підприємств (м'ясокомбінатів, риболовецьких суден та ін.), зазнають гідроабразивного зношування.

Як відомо, абразивне зношування виникає, коли поверхні виробів піддаються високому механічному навантаженню через наявність більш твердих частинок, які можуть діяти як абразив [3]. Під час роботи відбувається зношування шляхом мікрорізання, мікроруйнування та прискореної втоми внаслідок періодичних деформацій, таких як мікротиснення або виривання окремих зерен.

Щоб вирішити проблеми абразивного зношування, застосовують різні інженерні рішення, наприклад, використання високолегованих сталей, застосування спеціальних видів термічного оброблення, поверхневої модифікації тощо [4]. Таким чином, розроблені високолеговані сталі, які володіють доброю зносостійкістю, що передусім пояснюється наявністю твердих фаз, таких як мартенсит, карбіди або борида [5]. Незважаючи на те, що ці сталі

відомі своєю високою зносостійкістю, вони також забезпечують достатню міцність. Досягнення відповідного співвідношення твердості та в'язкості має вирішальне значення для зносостійких матеріалів, оскільки це забезпечує здатність матеріалу протистояти динамічним навантаженням та запобігати передчасному руйнуванню. Однак використання дорогих і рідкісних елементів для легування з метою формування твердих зміцнювальних фаз сприяє підвищенню ціни матеріалу. Крім того, для досягнення бажаних властивостей зазвичай потрібна трудомістка та дорога термічна або термомеханічне оброблення. Тому ефективним рішенням забезпечення абразивної зносостійкості є формування покриттів на робочих поверхнях з високою адгезійною міцністю.

Постановка проблеми. Властивості поверхні значною мірою контролюють інженерні характеристики матеріалу і, по суті, визначають його функціональні властивості. У зв'язку з цим покриття, призначені для посилення однієї або декількох властивостей поверхні матеріалу, залежать від вимог до деталі.

На сьогодні є значна кількість методів модифікації поверхні. Найбільш затребуваними є методи, що засновані на використанні концентрованих потоків енергії (КПЕ). Серед них заслуговує уваги електроіскрове легування (ЕІЛ) завдяки своїм перевагам, таким як просте обладнання та легкість експлуатації, міцне металургійне з'єднання покриття з основою, екологічність та економічність [6]. ЕІЛ використовується для відновлення деталей і нанесення покриття на металеві матеріали [7]. Процес ЕІЛ заснований на явищі електроерозії та полярному перенесенні матеріалу анода (електрода) на катод (деталь) під час імпульсного електричного розряду між анодом і катодом, який відбувається в газовому середовищі. Розряд призводить до викиду дуже гарячих мікрочастинок електродного матеріалу в мікровакуум розплаву на катоді, перемішування матеріалу і швидкого затвердіння після його завершення. Унаслідок багаторазової дії розрядів на поверхні з'являються утворюється покриття, що забезпечує економію енергії, оскільки відсутній об'ємний нагрів підкладки. Основні переваги ЕІЛ-покриттів пов'язані зі слабкою термічною дією на матеріал основи та міцним металургійним зв'язком перенесеного матеріалу з підкладкою, що забезпечує високу адгезію покриття. Крім того, процес ЕІЛ є екологічним та енергоефективним. Багато досліджень показали, що до недоліків електроіскрових покриттів можна віднести як високу концентрацію дефектів, таких як пористість і мікротріщини, так і високу шорсткість поверхні [8].

З метою усунення дефектів, що виникли під час ЕІЛ, підвищення ефективності процесу, застосовують комбіновані технології на основі ЕІЛ, такі як послідовне ЕІЛ і поверхневе пластичне деформування (ППД), ЕІЛ і лазерне оброблення (ЛО), ЕІЛ і магнетронне напилення тощо [9; 10]. Подальше оброблення забезпечує підвищення якості ЕІЛ покриттів, знижує шорсткість, сприяє забезпеченню міцнішого адгезійного зв'язку з підкладкою, позитивно впливає на властивості тощо. Тому розроблення інтегрованих методів синтезу покриттів на основі КПЕ є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для захисту поверхонь деталей, що працюють в умовах абразивного зносу, дедалі більшого застосування знаходить метод електроіскрового легування (ЕІЛ) [11-13]. Використання інтегрованих технологій може сприяти збільшенню товщини шару, відновленого методом ЕІЛ, дозволяючи створювати поверхневі шари із заданими фізико-хімічними та механічними властивостями [14].

Дослідники [15; 16] вважають дуже ефективними процеси комбінованого оброблення, які поєднують вплив іскрового розряду та подальше ЛО на зміцнювану поверхню. ЛО дозволяє зменшити пористість ЕІЛ-покриттів, усунути подряпини, тріщини та неоднорідності, а також підвищити щільність покриття [17]. Під впливом лазерного імпульсу відбувається локальне плавлення ЕІЛ покриття і сталевий підкладки під ним. У результаті

термокапілярної конвекції, спричиненої нерівномірним розподілом температури на поверхні розплаву і віддачею потоку плазми, легувальна речовина дифундує в підкладку, що дозволяє значно збільшити глибину легованого шару [18]. Проте ЛО може призвести до вигорання (випаровування) легкоплавких компонентів, тому комбіновані технології отримання покриттів, що включають ЛО, потребують додаткових досліджень.

Актуальним напрямком є поєднання електричного впливу на поверхню з подальшим нанесенням полімерних [19] і металополімерних матеріалів (МПМ) [20]. Технологія ЕІЛ + МПМ дає змогу отримати необхідну висоту мікронерівностей (шорсткість), а подальше лезове оброблення – забезпечити різне співвідношення площ із нанесеного металу та МПМ. Як армувальний матеріал МПМ можна використовувати волокна, дроти, порошки мікро- та нанорозмірів тощо. У роботі [21] досліджено композиційний матеріал, армований дротами, але досягти рівномірного розподілу армуючих елементів не вдалося. Отже, дослідження структури та властивостей композиційних матеріалів, призначених для нанесення покриттів КПЕ, потребує подальшого розвитку та вдосконалення технології.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Нині актуальними є комбіновані технології модифікації поверхні й формування функціональних покриттів. Не досліджено впливу режимів ЛО під час комбінованого оброблення на структуру та властивості покриттів.

Метою статті є дослідження структури та властивостей комбінованих покриттів на сталі, отриманих послідовним ЕІЛ, нанесенням МПМ, армованим порошком ВК6, з наступним лазерним обробленням.

Методика досліджень. У ролі підкладки використовували зразки зі сталі 12Х18Н10Т розміром 15×15×8 мм. ЕІЛ здійснювали на установці «Елітрон 52-А». Як електрод інструмент (ЕІ) використовували твердий сплав марки Т15К6, яким відповідно до [22] здійснювали процес легування, що забезпечувало 100 % суцільність, товщину прирощеного шару 0,12 мм і шорсткість поверхні $R_z = 37$ мкм. Далі на оброблену поверхню наносили МПМ, який виготовляли шляхом змішування порошку ВК6 (60 % за масою) й епоксидної системи з феросиліконом марки «Loctite 3478». Після тверднення МПМ протягом 24 год поверхню піддавали обробленню лазером моделі «Laser Nd-YAG BLS 720» (ROFIN-BAASEL Lasertech, Німеччина) (рис. 1) у режимі оплавлення. Параметри ЛО подані в табл. 1.

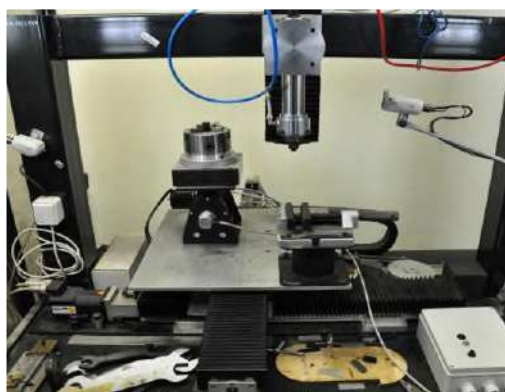


Рис. 1. Лазер Nd-YAG BLS 720

Таблиця 1 – Режими лазерного оброблення

Режим	Подача, мм/хв	Напруга, В	Імпульс лазера, с	Частота, Гц
1	120	500	$0,3 \cdot 10^{-3}$	100
2		500		50
3		500	10^{-3}	50
4		550		50
5		600		50

Металографічні дослідження проведені за стандартною методикою, використовуючи оптичний мікроскоп «Неофот-2». Визначення мікротвердості покриття й її розподілу виконували за допомогою приладу ПМТ-3 під навантаженням 0,05 Н, відповідно до ГОСТ 9450-76. Шорсткість поверхні контролювали на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр».

З метою оцінювання гідроабразивної зносостійкості визначали знос за втратою маси зразків через кожні 8 год. Для цього була виготовлена дослідна установка (рис. 2). Зразки фіксували на диску за допомогою тримачів під кутом 45 град, швидкість обертання 120 об/хв. Випробуванням піддавали зразки після оброблення: без покриття; ЕІЛ Т15К6; ЕІЛ Т15К6 + МПМ; ЕІЛ Т15К6 + МПМ + ЛО.

Абразивним матеріалом слугувала водна суміш піску з розміром частинок 0,1-0,5 мм, випробування проводили впродовж 16 і 24 год.

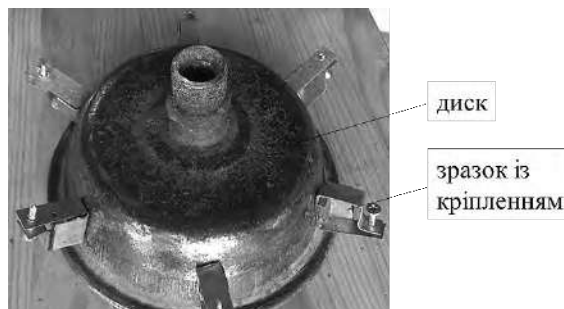


Рис. 2. Закріплення зразків на диску

Джерело: розроблено авторами.

Результати дослідження. Проведений металографічний аналіз зразків після оброблення електродом із твердого сплаву Т15К6 (рис. 3, а). На мікроструктурі можна виділити декілька ділянок. На поверхні формується темний шар, який, очевидно, формується в результаті змішування матеріалу підкладки, легувального електрода й навколишнього середовища, а також осадження твердого сплаву під час ЕІЛ. Під верхнім шаром розташовується перехідна зона, що виникає в результаті дифузії елементів ЕІ і термічного впливу. Основа – підкладка – сталь 12Х18Н10Т, що має аустенітну структуру. На рис. 3, б подані показники отриманого в результаті оброблення шару. Необхідно зазначити, що значення мікротвердості від поверхні поступово зменшуються від свого максимального значення на поверхні (5000...5400 МПа) до основи (1800...2000 МПа). Суцільність покриття, визначена металографічним методом, становила 90 %.



а

Показник	Значення
Мікротвердість, МПа	5000–5400
Товщина, мкм	50
Суцільність, %	90
Шорсткість поверхні, R_z , мкм	37

б

Рис. 3. Мікроструктура після ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 (а)
і показники якості отриманого поверхневого шару (б)

Джерело: розроблено авторами.

З метою визначення впливу лазерного оброблення на формування покриттів, отриманих комбінованою технологією, зразки після ЕІЛ твердим сплавом і нанесення МПМ піддавали дії лазерного променя за режимами, зазначеними в табл. 1.

Металографічний аналіз досліджуваних зразків показав, що покриття має шарувату будову. Перший, приповерхневий шар, другий – підповерхневий, третій – дифузійна зона й матеріал підкладки (рис. 4). Параметри отриманих шарів залежить від режимів ЛО (табл. 3).

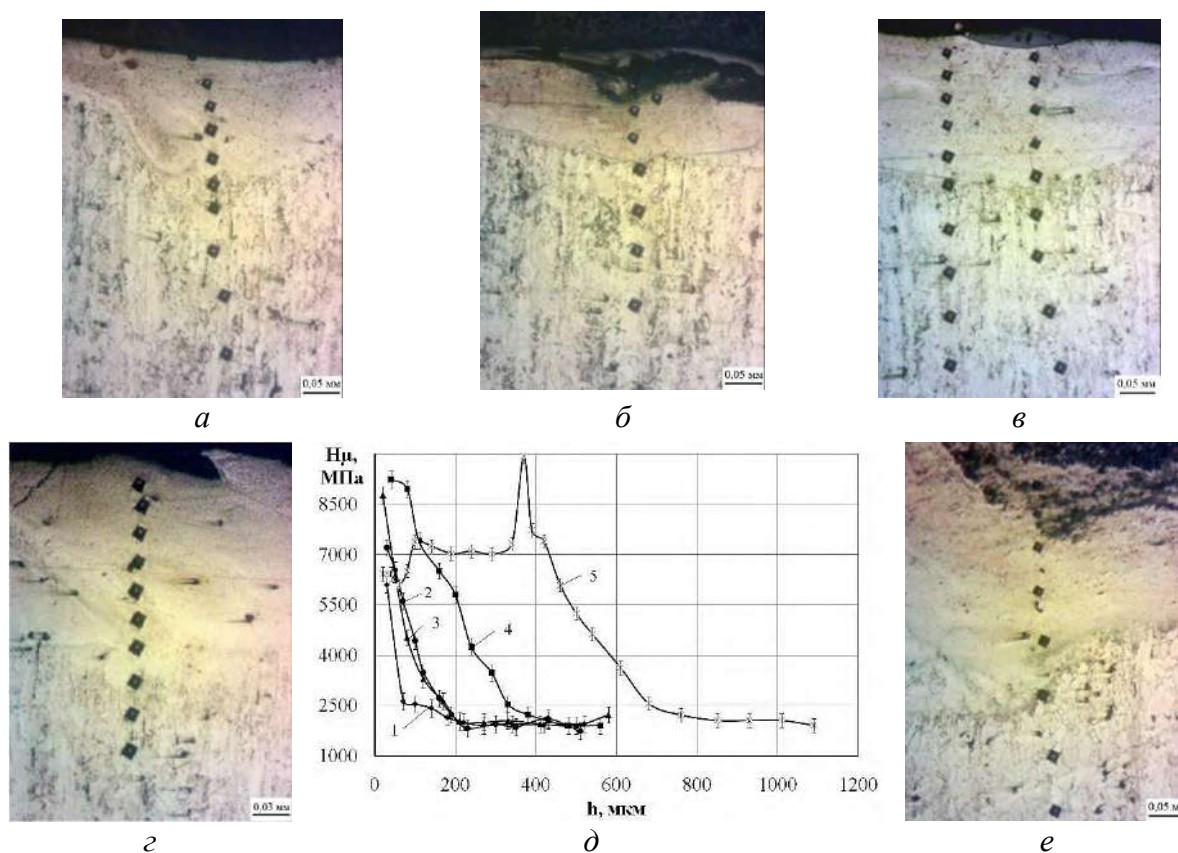


Рис. 4. Мікроструктури та розподіл мікротвердості за глибиною покриття, отриманого за комбінованою технологією за різних режимів ЛО:

a – режим 1; *б* – режим 2; *в* – режим 3; *г* – режим 4; *е* – режим 5;

д – розподіл мікротвердості в покритті, отриманого за різних режимів ЛО (1, 2, 3, 4, 5, відповідно, номер режиму)

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 3 – Параметри ділянок комбінованого покриття

Режим ЛО	Товщина, мкм	Мікротвердість, МПа	Суцільність, %	Шорсткість поверхні R_a , мкм
1	10 / 100*	6110 / 2650	65 / 100	2,1
2	40 / 130	7200 / 4500	95 / 100	3,3
3	50 / 190	8900 / 6500	95 / 100	6,2
4	100 / 230	9250 / 7250	100 / 100	8,1
5	420 / 260	10000 / 7300	100 / 100	9,0

* – приповерхневий шар / підповерхневий шар.

Мікроструктура покриттів після ЛО за режимом 1 характеризується наявністю тонкого приповерхневого шару (до 10 мкм) з максимальною мікротвердістю 6110 МПа (рис. 4, *a*, *д* – залежність 1). Цей шар відрізняється нерівномірною товщиною та має суцільність близько 65 %. Під ним знаходиться підповерхневий шар, який демонструє знижену травимість у царській горілці, використаний для аналізу мікроструктури, та має твердість до 2650 МПа, середню товщину близько 100 мкм і повну суцільність (100 %). Металог-

рафічний аналіз не виявив чітко вираженого перехідного шару між цими ділянками покриття. Дифузійна зона у мікроструктурі не простежується, що, ймовірно, пояснюється природою підкладки – аустенітною сталлю, яка не зазнає фазових перетворень при нагріванні та охолодженні. Водночас дюрOMETричний аналіз свідчить про відмінну від підкладки твердість дифузійної зони (рис. 4, δ), що вказує на протікання дифузійних процесів і зміцнення основного матеріалу.

Під час ЛО за режимом 2 спостерігається збільшення товщини та мікротвердості сформованих у покритті зон (табл. 3). Зовнішній шар досягає максимальної твердості до 7200 МПа, тоді як другий шар має товщину близько 130 мкм і твердість у межах 3200–4500 МПа (рис. 4, δ , залежність 2). Обидва шари характеризуються високою суцільністю (до 100 %) та однорідною структурою й товщиною. Зростання товщини та мікротвердості зміцненого шару під час оброблення за режимом 2 пояснюється зміною параметрів лазерного променя, зокрема зниженням частоти ЛО зі 100 до 50 Гц.

ЛО за режимом 3 спричиняє формування приповерхневого шару товщиною до 50 мкм з максимальною твердістю близько 8900 МПа. Під ним розташовується підповерхневий шар товщиною приблизно 190 мкм і мікротвердістю близько 6500 МПа (рис. 4, δ – залежність 3). Дослідження підтвердили, що зі збільшенням тривалості імпульсу лазера від $0,3 \times 10^{-3}$ до 10^{-3} с (табл. 1, режими 2 і 3) відбувається зростання товщини та мікротвердості зміцненого шару (табл. 3).

Металографічні дослідження покриттів, отриманих за режимом 4, показали, що верхній шар має товщину до 100 мкм, максимальну мікротвердість (до 9250 МПа) та повну суцільність (100 %) (рис. 4, δ – залежність 4). Зі збільшенням напруги від 500 до 550 В (перехід від режиму 3 до режиму 4) спостерігається зростання товщини та мікротвердості шарів. Підповерхневий шар має мікротвердість у межах 6000...7250 МПа, яка поступово зменшується з глибиною. Його середня товщина складає приблизно 230 мкм (табл. 3).

Мікроструктура шару, сформованого за режимом 5, подібна до інших режимів і містить три зони. Найтовщіший зовнішній шар (до 420 мкм) має характерну пористу будову (рис. 4, δ) з твердістю в діапазоні 6100...7300 МПа, а окремі ділянки досягають твердості 10 ГПа (рис. 4, δ – залежність 5). Підповерхневий шар (до 260 мкм) слабо піддається травленню реактивом, а його максимальна твердість на межі з першою зоною становить 7400 МПа, поступово знижуючись до рівня твердості основного металу.

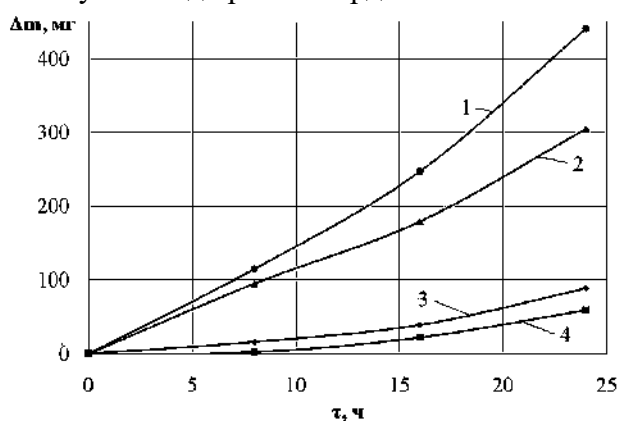


Рис. 5. Залежність абразивного зношування (за втратою маси) від часу випробування зразків:

1 – без покриття; 2 – ЕІЛ твердим сплавом Т15К6; 3 – ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 + МПМ; 4 – ЕІЛ твердим сплавом + МПМ + ЛО за режимом 5

Для оцінки абразивної зносостійкості покриттів були проведені випробування на зношування в абразивному середовищі. Найбільше піддаються зносу зразки, які не зазнавали оброблення (рис. 5). Найвищу стійкість до абразивного зношування продемонструють покриття, отримані за комбінованою технологією: послідовне ЕІЛ твердим сплавом, нанесення МПМ і остаточна ЛО за режимом 5. Лазерне оброблення позитивно впливає на показники абразивної зносостійкості. Під час ЛО відбувається спікання порошкових частинок і затвердіння епоксидної системи, що сприяє збільшенню глибини зміцненого шару. Покриття ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 мають недостатню товщину для тривалої роботи в абразивному середовищі. У покриттях, отриманих лише за технологією ЕІЛ + МПМ, очевидно, міжчастинкові контакти твердого сплаву мають недостатню міцність, оскільки їх зчеплення забезпечується виключно механічним взаємодією з компонентами МПМ.

Висновок. Проведений аналіз методу електроіскрового легування, комбінованих технологій на основі ЕІЛ, що забезпечують підвищення товщини зміцненого шару та абразивної зносостійкості. Отримані та досліджені зразки зі сталі 12Х18Н10Т з покриттями: ЕІЛ твердим сплавом Т15К6; ЕІЛ Т15К6 з подальшим нанесенням МПМ з наступною ЛО за п'ятьма режимами. Застосування ЛО дозволило збільшити товщину покриття до 600 мкм з мікротвердістю 7,3-10,0 ГПа і суцільністю 100 %.

Дослідження зразків із різними покриттями на гідроабразивне спрацювання протягом 24 годин, яке оцінювалося за втратою маси, показало, що покриття, отримане за комбінованою технологією ЕІЛ + МПМ + ЛО (режим 5), має зносостійкість, що перевищує аналогічний показник зразків без покриття у 7,5 раза, а зразків після лише ЕІЛ твердим сплавом Т15К6 – у 5 разів.

Результати частково отримано в рамках науково-дослідного проєкту «Розробка екологічно безпечних технологій модифікації поверхні деталей обладнання електростанцій комбінованими методами, заснованими на електроіскровому легуванні» за фінансування Міністерства освіти і науки України (держ. реєстр. No 0124U000539, Сумський державний університет).

Список використаних джерел

1. Narayanaswamy, B., Hodgson, P., Timokhina, I., & Beladi, H. (2016). The Impact of Retained Austenite Characteristics on the Two-Body Abrasive Wear Behavior of Ultrahigh Strength Bainitic Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(10), 4883–4895. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3690-5>.
2. Rajput, A. S., & Das, S. (2025). Abrasive wear behaviour of continuously cooled carbide-free bainitic steel. *Wear*, 205951. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205951>.
3. Gupta, B. R. (2023). 3 - Friction and wear mechanism of polymers, their composites and nanocomposites. *Tribology and Surface Engineering, Tribology of Polymers, Polymer Composites, and Polymer Nanocomposites*, 51-117. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90748-4.00012-1>.
4. Pawlowski, L. (2025). Physical Deposition Methods for Films and Coatings. <https://doi.org/10.1002/9781119713128>.
5. Lentz, J., Röttger, A., & Theisen, W. (2019). Microstructures, Heat Treatment, and Properties of Boron-Alloyed Tool Steels. *Steel research international*, 91(5), 1900416. <https://doi.org/10.1002/srin.201900416>.
6. Wang, J., Zhang, M., Dai, S., & Zhu, L. (2023). Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings*, 13(8), 1473. <https://doi.org/10.3390/coatings13081473>.
7. Haponova O., Tarelnyk V., Mościcki T., Tarelnyk N. (2024). Investigating the effect of electrospark alloying parameters on structure formation of modified nitrogen coatings. *Bulletin of the polish academy of sciences: technical sciences*, 72 (5), 1-8. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.150802>.

8. Barile, C., Casavola, C., Pappalettera, G., & Renna, G. (2022). Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*, 12(10), 1536. <https://doi.org/10.3390/coatings12101536>.
9. Radek, N., Pietraszek, J., Gądek-Moszczak, A., Orman, Ł. J., & Szczotok, A. (2020). The Morphology and Mechanical Properties of ESD Coatings before and after Laser Beam Machining. *Materials*, 13(10), 2331. <https://doi.org/10.3390/ma13102331>.
10. Abdi, F., Aghajani, H., Taghizadeh Tabrizi, A., Nasimi, L., & Fazli Shokouhi, F. (2023). Study on the effect of the crack closing of AlCoCrFeMnNi high entropy alloy electro-spark deposited coating by plasma nitriding on the corrosion resistance. *Journal of Alloys and Compounds*, 966(5), 171629. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171629>.
11. Tarel'nik, V. B., Paustovskii, A. V., Tkachenko, Y. G., Martsinkovskii, V. S., Konoplyanchenko, E. V., & Antoshevskii, K. (2017). Electric-spark coatings on a steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53(3), 285-294. <https://doi.org/10.3103/s1068375517030140>.
12. Johnson, R. N. (1995). Electro-spark deposited coatings for high temperature wear and corrosion applications. *Elevated Temperature Coatings: Science and Technology*; ed. by N.B. Dahotre, J.M. Hampikian, and J.J. Stiglich. Warrendale, PA: The Minerals, Metals, and Materials Society, 265-275.
13. Коновал, В. П., Уманський, О. П., Панасюк, А. Д., Подчерняєва, І. О., & Коваль, О. Ю. (2009). Формування електроіскрових покриттів із композиційних матеріалів на основі карбіду і дибориду титану-хрому. *Надтверді матеріали*, (4), 84-91.
14. Ruizhu, Z., Jingrui, L., Dakao, Y., & Yuanyuan, Z. (2015). Mechanical Properties of WC-8Co Wear-Resistant Coating on Pump Impellers Surface by Electro- Spark. *Rare Metal Materials and Engineering*, 44(7), 1587-1590. [https://doi.org/10.1016/s1875-5372\(15\)30097-7](https://doi.org/10.1016/s1875-5372(15)30097-7).
15. Mihailov, V., Kazak, N., Ivashcu, S., Ovchinnikov, E., Baci, C., Ianachevici, A., Rukuiza, R., & Zunda, A. (2023). Synthesis of Multicomponent Coatings by Electrospark Alloying with Powder Materials. *Coatings*, 13(3), 651. <https://doi.org/10.3390/coatings13030651>.
16. Radek, N., & Bartkowiak, K. (2010). Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam. *Physics Procedia*, 5, 417-423. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.163>.
17. Antoszewski, B., & Tarelnyk, V. (2014). Laser Texturing of Sliding Surfaces of Bearings and Pump Seals. *Applied Mechanics and Materials*, 630, 301-307. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.630.301>.
18. Radek, N., Bronček, J., Fabian, P., Pietraszek, J., & Antoszewski, K. (2015). Properties of the Electro-Spark Deposited Coatings - Technology and Applications. *Materials Science Forum*, 818, 61-64. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.818.61>.
19. Tarel'nik, V. B., Konoplyanchenko, E. V., Kosenko, P. V., & Martsinkovskii, V. S. (2017). Problems and Solutions in Renovation of the Rotors of Screw Compressors by Combined Technologies. *Chemical and Petroleum Engineering*, 53(7-8), 540-546. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>.
20. Tarelnyk, V., Martsynkovskyy, V., Sarzhanov, A., Pavlov, A., Gerasimenko, V., & Sarzhanov, B. (2017). Improvement of integrated technology for restoring surfaces of steel and iron parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233, 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/233/1/012050>.
21. Тарельник, В., Марцинковський, В., & Павлов, О. (2017). Спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей (Патент № 115676).
22. Тарельник В.Б., Марцинковський В.С., Гапонова О.П., Тарельник Н.В., Павлов О.Г., Саржанов Б.О., & Антошевський Б. (2019). Спосіб відновлення зношених поверхонь деталей машин з нержавіючої сталі(Патент № 131805).

References

1. Narayanaswamy, B., Hodgson, P., Timokhina, I., & Beladi, H. (2016). The Impact of Retained Austenite Characteristics on the Two-Body Abrasive Wear Behavior of Ultrahigh Strength Bainitic Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(10), 4883-4895. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3690-5>.

2. Rajput, A. S., & Das, S. (2025). Abrasive wear behaviour of continuously cooled carbide-free bainitic steel. *Wear*, 205951. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205951>.
3. Gupta, B. R. (2023). 3 - Friction and wear mechanism of polymers, their composites and nanocomposites. *Tribology and Surface Engineering, Tribology of Polymers, Polymer Composites, and Polymer Nanocomposites*, 51-117. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90748-4.00012-1>.
4. Pawlowski, L. (2025). Physical Deposition Methods for Films and Coatings. <https://doi.org/10.1002/9781119713128>.
5. Lentz, J., Röttger, A., & Theisen, W. (2019). Microstructures, Heat Treatment, and Properties of Boron-Alloyed Tool Steels. *Steel research international*, 91(5), 1900416. <https://doi.org/10.1002/srin.201900416>.
6. Wang, J., Zhang, M., Dai, S., & Zhu, L. (2023). Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings*, 13(8), 1473. <https://doi.org/10.3390/coatings13081473>
7. Haponova O., Tarelnyk V., Mościcki T., Tarelnyk N. (2024). Investigating the effect of electrospark alloying parameters on structure formation of modified nitrogen coatings. *Bulletin of the Polish academy of sciences: Technical sciences*, 72 (5), 1-8. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.150802>
8. Barile, C., Casavola, C., Pappalettera, G., & Renna, G. (2022). Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review. *Coatings*, 12(10), 1536. <https://doi.org/10.3390/coatings12101536>.
9. Radek, N., Pietraszek, J., Gądek-Moszczak, A., Orman, Ł. J., & Szczotok, A. (2020). The Morphology and Mechanical Properties of ESD Coatings before and after Laser Beam Machining. *Materials*, 13(10), 2331. <https://doi.org/10.3390/ma13102331>.
10. Abdi, F., Aghajani, H., Taghizadeh Tabrizi, A., Nasimi, L., & Fazli Shokouhi, F. (2023). Study on the effect of the crack closing of AlCoCrFeMnNi high entropy alloy electro-spark deposited coating by plasma nitriding on the corrosion resistance. *Journal of Alloys and Compounds*, 966(5), 171629. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171629>
11. Tarelnyk, V. B., Paustovskii, A. V., Tkachenko, Y. G., Martsinkovskii, V. S., Konoplyanchenko, E. V., & Antoshevskii, K. (2017). Electric-spark coatings on the steel base and contact surface for optimizing the working characteristics of babbitt friction bearings. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53(3), 285-294. <https://doi.org/10.3103/s1068375517030140>.
12. Johnson, R. N. (1995). Electro-spark deposited coatings for high temperature wear and corrosion applications. *Elevated Temperature Coatings: Science and Technology*; ed. by N.B. Dahotre, J.M. Hampikian, and J.J. Stiglich. Warrendale, PA: The Minerals, Metals, and Materials Society, 265-275.
13. Konoval, V. P., Umanskyi, O. P., Panasiuk, A. D., Podcherniaieva, I. O., Koval, O. Yu. (2009). Formuvannia elektroiskrovykh pokryttiv iz kompozytsiinykh materialiv na osnovi karbidu i dyborydu tytanu-khromu [Formation of electrospark coatings from composite materials based on titanium-chromium carbide and diboride]. *Nadtverdi materialy*, 4, 84-91.
14. Ruizhu, Z., Jingrui, L., Dakao, Y., & Yuanyuan, Z. (2015). Mechanical Properties of WC-8Co Wear-Resistant Coating on Pump Impellers Surface by Electro- Spark. *Rare Metal Materials and Engineering*, 44(7), 1587-1590. [https://doi.org/10.1016/s1875-5372\(15\)30097-7](https://doi.org/10.1016/s1875-5372(15)30097-7).
15. Mihailov, V., Kazak, N., Ivashcu, S., Ovchinnikov, E., Baci, C., Ianachevici, A., Rukuiza, R., & Zunda, A. (2023). Synthesis of Multicomponent Coatings by Electrospark Alloying with Powder Materials. *Coatings*, 13(3), 651. <https://doi.org/10.3390/coatings13030651>.
16. Radek, N., & Bartkowiak, K. (2010). Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam. *Physics Procedia*, 5, 417-423. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.163>.
17. Antoszewski, B., & Tarelnyk, V. (2014). Laser Texturing of Sliding Surfaces of Bearings and Pump Seals. *Applied Mechanics and Materials*, 630, 301-307. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.630.301>.
18. Radek, N., Bronček, J., Fabian, P., Pietraszek, J., & Antoszewski, K. (2015). Properties of the Electro-Spark Deposited Coatings - Technology and Applications. *Materials of the Science Forum*, 818, 61-64. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.818.61>.

19. Tarel'nik, V. B., Konoplyanchenko, E. V., Kosenko, P. V., & Martsinkovskii, V. S. (2017). Problems and Solutions in Renovation of the Rotors of Screw Compressors by Combined Technologies. *Chemical and Petroleum Engineering*, 53(7-8), 540–546. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0378-7>.
20. Tarelnyk, V., Martsynkovskyy, V., Sarzhanov, A., Pavlov, A., Gerasimenko, V., & Sarzhanov, B. (2017). Improvement of integrated technology for restoring surfaces of steel and iron parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 233, 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/233/1/012050>.
21. Tarelnyk, V., Martsynkovskiy, V., & Pavlov, O. (2017). Sposib vidnovlennia znoshenykh poverkhon metalevykh detalei [Method for restoring worn surfaces of metal parts] (Patent № 115676).
22. Tarelnyk V.B., Martsynkovskiy V.S., Haponova O.P., Tarelnyk N.V., Pavlov O.H., Sarzhanov B.O., & Antoshevskiy B. (2019). Sposib vidnovlennia znoshenykh poverkhon detalei mashyn z nerzhaviuchoi stali [Method for restoring worn surfaces of stainless steel machine parts] (Patent № 131805).

Отримано 05.03.2025

UDC 669.14.018.29:669.11

**Oksana Haponova¹, Viacheslav Tarelnyk², Natalia Tarelnyk³,
Gennadiy Laponog⁴, Dmytro Torhachov⁵**

¹Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4866-0599>. Researcher ID: 56938828500

²Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Technical Service and Industrial Engineering Department
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: tarelnyk@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2005-5861>. Researcher ID: 56436591000

³PhD in Economics, Associate Professor of the Technical Systems Design Department
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)

E-mail: natasha-tarelnik@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6304-6925>. Researcher ID: 57195836961

⁴Postgraduate student of the Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: glaponog@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7538-4682>

⁵Student of the Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: torgachovdmitriy@gmail.com

INCREASING THE HYDROABRASIVE WEAR RESISTANCE OF SURFACES BY COMBINED METHODS BASED ON ELECTROSPARK ALLOYING AND LASER TREATMENT

Combined technologies based on electrospark alloying (ESA), such as sequential ESA followed by laser treatment (LT), are used to improve ESA and increase efficiency of the process. Development of integrated methods for synthesis of coatings is relevant because it allows the quality of the surface layers to be improved and the service life of critical machine parts to be extended. In the literature, combination of electrical impact on the surface with subsequent application of metal-polymer materials (MPM) is proposed. The ESA + MPM technology makes it possible to obtain the required height of micro-irregularities (roughness), and subsequent cutting allows different ratio of the areas of applied metal and MPM. However, this technology has disadvantages. To overcome them, a new method of surface treatment is proposed. The aim of this paper is to study the structure and properties of combined coatings on steel obtained by sequential ESA, MPM application reinforced with VK6 powder, followed by LT in different modes. After machining, specimens were subjected to surface roughness determination, metallographic studies, microhardness distribution and abrasive wear resistance tests. Special set-up was designed to determine the abrasive wear resistance. The metallographic analysis showed that samples after combined treatment have a layered structure. The surface layer has the highest hardness of 6100-7300 MPa and in some areas up to 10 GPa. The outer layer is up to 420 μm thick. The sub-surface layer (up to 260 μm) is poorly etched by the reagent and has maximum hardness of 7400 MPa. Tests on abrasive wear showed that the untreated specimens suffered the most wear. The coatings obtained by the combined technology demonstrated the highest resistance: sequential ESA with a hard alloy, MPM application and final LT, and has wear resistance that exceeds the same indicator of uncoated samples by 7.5 times. Therefore, the technology studied for obtaining combined coatings can be recommended to increase thickness of the wear resistant coating and to ensure abrasive wear resistance of surfaces.

Keywords: electrospark alloying; laser treatment; microstructure; abrasive wear resistance; coating.

Fig.: 5. References: 22.

Гапонова О. П., Тарельник В. Б., Тарельник Н. В., Лапоног Г. П., Торгачов Д. В. Підвищення гідроабразивної зносостійкості робочих поверхонь комбінованими методами на основі електроискрового легування і лазерного оброблення. *Технічні науки та технології*. 2025. № 1(39). С. 22-31.

Микола Анатолійович Зенкін¹, Олександр Ігорович Шведченко²

¹доктор технічних наук, професор,

професор кафедри машин і агрегатів поліграфічного виробництва

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: nikolay_zenkin@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-0572>. ResearcherID: AHB-4549-2022

²аспірант кафедри машин і агрегатів поліграфічного виробництва

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: shvedchenko.sasha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3649-1276>

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ МЕХАНІЧНИХ ПРИВОДІВ РУЛОННИХ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН НА ТОЧНІСТЬ СУМІЩЕННЯ ФАРБ

У статті проведено детальне дослідження конструктивних особливостей механічних приводів рулонних друкарських машин та їхнього впливу на точність суміщення фарб у багатобарвному друці, що є визначальним фактором для забезпечення високої якості друкарської продукції. Обґрунтовано необхідність створення теоретичної моделі руху стрічкопровідних елементів, яка враховує динамічні характеристики, геометричні особливості конструкцій приводів і їхній вплив на точність процесу фарбоперенесення. У роботі було розроблено систему диференціальних рівнянь, що дозволяє не лише прогнозувати поведінку друкарських систем під різними умовами, але й оптимізувати їхню роботу відповідно до сучасних вимог поліграфічної галузі. Запропоновано впровадження гібридних систем приводів, які поєднують механічні та електронні компоненти, що сприяє значному зменшенню рівня вібрацій і підвищенню точності суміщення фарб.

Ключові слова: рулонні друкарські машини; механічні приводи; точність суміщення фарб; вібрації та коливання; фарбоперенесення; оптимізація конструкцій.

Рис.: 2. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Сучасні рулонні друкарські машини посідають центральне місце в поліграфічній галузі, адже вони здатні забезпечувати як високі швидкості друку, так і відповідну якість, що є необхідною умовою для виготовлення широкого спектра друкованої продукції. Водночас одним із ключових факторів, що впливають на кінцеву якість друку, є точність суміщення фарб, яка визначає відповідність готової продукції встановленим стандартам. Особливості конструкції механічних приводів друкарських машин мають безпосередній вплив на забезпечення високої точності та стабільності їхньої роботи. Ігнорування цього аспекту може призвести до значних витрат, пов'язаних із виробництвом бракованої продукції, простоем обладнання або навіть погіршенням репутації виробника. У контексті постійного підвищення вимог до якості друку дослідження, спрямовані на аналіз і вдосконалення конструктивних особливостей механічних приводів для досягнення точного суміщення фарб, є надзвичайно важливими.

Постановка проблеми. Однією з найважливіших задач, яка стоїть перед поліграфічними підприємствами, є досягнення стабільної та високої точності суміщення фарб у процесі друку, особливо за умов роботи на високих швидкостях. Попри те, що поліграфічна галузь демонструє значний прогрес у розвитку технологій, численні аспекти, пов'язані з конструкцією механічних приводів рулонних друкарських машин, залишаються досить малодослідженими. Відсутність системного підходу до аналізу впливу конструктивних характеристик приводів на точність друку ускладнює вирішення проблеми суміщення фарб і знижує ефективність процесу друку. Таким чином, основною проблемою є необхідність створення науково обґрунтованих рішень для вдосконалення конструкції механічних приводів, що дозволить забезпечити стабільність роботи друкарського обладнання та високу якість кінцевої продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження, спрямовані на аналіз конструктивних особливостей механічних приводів друкарських машин та їхнього впливу на точність суміщення фарб, посідають одне з провідних місць у сучасній поліграфічній інженерії та активно розвиваються у численних наукових роботах.

Значущість цього напрямку особливо підкреслюють дослідження, присвячені вивченню динамічних властивостей механічних приводів друкарських машин. Наприклад, у роботах [1], [2] наголошується на ключовій ролі друкарських циліндрів як основного джерела вібрацій, які викликають дефекти друку, найбільш поширеним серед яких є нерівномірність оптичної щільності. Автори зазначають, що небажані вібрації виникають унаслідок прямого контакту між основними циліндрами друкарського блоку, що, своєю чергою, створює додаткові динамічні навантаження на приводи, негативно впливаючи на точність друку.

Інші дослідники, наприклад, у роботах [3], [4], акцентують увагу на вимірюваннях коливань друкарських циліндрів у реальних умовах експлуатації друкарських машин. Такі дослідження підтверджують значний вплив вібрацій на якість друку, а також пропонують різноманітні підходи для зменшення їхнього негативного впливу, зокрема шляхом вдосконалення конструкції механічних приводів і використання сучасних матеріалів із високими демпфуючими характеристиками, які здатні ефективно знижувати рівень коливань.

Динамічна поведінка друкарських блоків досліджується у роботах [5] та [6], де використовуються методи кінцевих елементів для моделювання поведінки друкарських циліндрів під впливом різних навантажень. У цих роботах детально аналізується проблема великої деформації контактних зон між циліндрами, яка є одним із головних чинників, що знижують якість фарбоперенесення. Завдяки математичному моделюванню була розроблена система рівнянь, яка враховує параметричні характеристики друкарського блоку, що дозволяє прогнозувати поведінку машини з високою точністю. У дослідженні [7] акцентується увага на геометричних відхиленнях друкарських циліндрів і їхньому впливі на точність суміщення фарб. Автори підкреслюють, що деформації циліндрів значно впливають на оптичні та механічні характеристики друкарського контакту, а тому врахування геометричних параметрів при розробці механічних приводів є критично важливим для мінімізації дефектів друку.

Окремі дослідники, такі як автори роботи [8], пропонують використання рівнянь Нав'є-Стокса у полярній системі координат для моделювання поведінки приводних елементів друкарських машин і сам підхід дозволяє врахувати вплив змінних характеристик друкарських апаратів і детально проаналізувати їхній вплив на точність суміщення фарб, що відкриває нові можливості для вдосконалення приводних систем. Крім того, наукові праці, такі як [9], наголошують на важливості оптимізації конструкції приводів з метою забезпечення стабільної роботи друкарських машин у широкому діапазоні швидкостей. Зокрема, пропонується впровадження гібридних приводних систем, які поєднують у собі механічні та електронні компоненти, що дозволяє мінімізувати вплив вібрацій і забезпечити високу якість друку.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Хоча є значні досягнення в дослідженні цієї проблеми, необхідність створення більш досконалих моделей для аналізу впливу конструктивних і динамічних характеристик приводів залишається актуальним завданням для сучасної поліграфічної інженерії.

Метою статті є дослідження впливу конструктивних характеристик механічних приводів рулонних друкарських машин на точність суміщення фарб, що дозволить виявити ключові аспекти, які впливають на стабільність і точність їхньої роботи.

Виклад основного матеріалу. Рулонні друкарські машини являють собою складні інженерні конструкції, які забезпечують процес нанесення зображень на рулонні матеріали, серед яких найчастіше використовуються папір, картон або полімерні плівки, завдяки багаторівневому друкарському циклу. Основними елементами таких машин є системи подачі рулонів, друкарські циліндри, механізми фарбоперенесення, сушильні

блоки, а також приводи, які координують злагоджену та синхронізовану роботу всіх складових. Точність суміщення фарб є одним із базових критеріїв якості друкарської продукції, що відображає рівень відповідності кольорових шарів їхнім проєктним положенням на формі. Вказаний параметр відіграє надзвичайно важливу роль у багатокольоровому друці, де кожен шар фарби наноситься окремо, але водночас повинен створювати гармонійне, чітке та яскраве зображення. Недостатня точність у суміщенні фарб може призводити до помітних дефектів, таких як «розходження кольорів», що негативно впливають на естетичний вигляд продукції й можуть суттєво знижувати її комерційну привабливість [10]. На точність суміщення фарб впливає комплекс технічних, конструктивних і експлуатаційних чинників. Особливу увагу необхідно приділяти стабільності роботи механічних приводів, синхронізації обертання друкарських циліндрів, жорсткості конструкції машини, а також рівню автоматизації процесу контролю друку. Точність друку формується під впливом низки факторів:

1. Конструктивні характеристики механічних приводів. Геометрична точність та якість виготовлення механічних вузлів, таких як шестерні, муфти або циліндри, визначають стабільність і плавність роботи системи, а будь-які люфти або неточності в цих елементах можуть спричинити асинхронність, що знижує точність друку.

2. Динамічні навантаження та вібрації. У процесі роботи друкарських машин на високих швидкостях можуть виникати вібрації, які впливають на точність суміщення шарів фарби. Для зниження таких впливів важливо забезпечити належну жорсткість конструкції та використовувати матеріали з демпфуючими властивостями.

3. Температурні та механічні деформації. Зміни температурного режиму під час друку можуть викликати термічне розширення або стискання окремих компонентів машини, що призводить до відхилень у точності, тому при проєктуванні передбачається застосування систем термостабілізації.

4. Технологічні параметри друку. Параметри, такі як швидкість роботи, властивості матеріалу, що використовується, а також в'язкість фарб, також впливають на точність суміщення кольорів; оптимізація цих параметрів дозволяє забезпечити стабільність друкарського процесу.

5. Системи автоматичного контролю. Застосування сучасних систем автоматичного моніторингу та корекції друку, які використовують оптичні сенсори та програмне забезпечення, значно покращує якість друку та зменшує залежність результатів від людського фактору [3; 8].

У рулонних друкарських машинах секційної побудови, які застосовуються для виконання багатобарвного друку, передача руху між друкарськими секціями зазвичай здійснюється через горизонтальний вал, як показано на рис. 1. Така конструкція хоча і була поширеною раніше, на сьогодні вважається застарілою через наявність негативних динамічних явищ, що суттєво впливають на точність роботи друкарських систем. Основним викликом у розробці високопродуктивних багатобарвних рулонних друкарських машин секційного типу є створення механічних приводів, які здатні забезпечити мінімальний рівень вібрацій у виконавчих механізмах під час роботи, що своєю чергою дозволяє досягти максимальної точності суміщення фарб при виконанні кольорового друку.

Механічні приводи таких машин складаються з високоточних систем передач, які забезпечують рух елементів друкарського обладнання. Одним із найактуальніших завдань у цьому напрямку є розробка приводів, що знижують низькочастотні коливання, оскільки такі коливання негативно впливають на стабільність роботи друкарської машини та можуть призводити до появи дефектів на друкованій продукції. Зокрема, вибір оптимальної системи приводу є ключовим етапом у проєктуванні сучасних рулонних друкарських машин, які повинні відповідати сучасним вимогам якості та продуктивності (рис. 1).

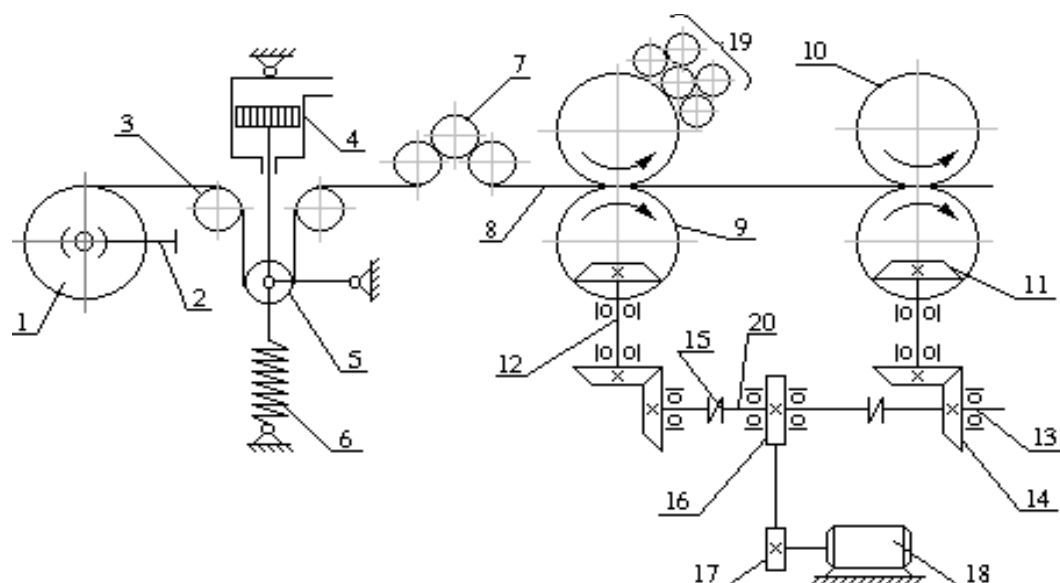


Рис. 1. Схема двофарбової рулонної машини секційної побудови:

- 1 – рулон; 2 – система гальмування рулону; 3 – стрічкопровідний вал; 4 – пневмоциліндр;
 5 – вал коливаний; 6 – пружина розтягування; 7 – система стабілізаційних валів;
 8 – паперова стрічка; 9 – перший вал; 10 – другий вал; 11 – кінцева шестерня;
 12 – вертикальний вал; 13 – опора горизонтального столу; 14 – кінцева пара;
 15 – пружна муфта; 16 – відомий шків; 17 – ведучий шків; 18 – електричний двигун;
 19 – апарат суміщення фарб; 20 – горизонтальний синхронізуючий вал
- Джерело: [11].

Особливістю приводної системи рулонних друкарських машин є необхідність забезпечення стійких динамічних характеристик у всіх робочих режимах, починаючи з моменту пуску машини та до її зупинки. Це означає, що система повинна бути здатною стабільно функціонувати як у режимах низької швидкості, так і при максимальних обертах, забезпечуючи при цьому точність руху всіх елементів машини. Саме тому створення приводів, що мінімізують вібрації та забезпечують високу стабільність у роботі, є пріоритетним завданням для розробників рулонних друкарських машин, орієнтованих на забезпечення високої точності суміщення фарб у процесі друку.

Технологічний процес друкування в рулонних друкарських машинах побудований на послідовному нанесенні шарів фарби, де кожен друкований апарат виконує свою функцію. У першому друкованому апараті стрічка покривається зображенням, нанесеним однією фарбою, а після певного інтервалу часу у другому апараті додається наступний шар фарби іншого кольору. Однак точність суміщення цих шарів залежить від багатьох факторів, серед яких домінують динамічні характеристики механічних приводів друкарської машини [12]. Для визначення ступеня розбіжності фарб на багатобарвних відбитках, які виникають внаслідок впливу вібрацій і коливань, необхідно створити розрахункову модель, яка враховує всі основні фактори впливу і властивості приводу. Зазначена модель повинна бути описана системою рівнянь руху стрічкопровідних елементів, що дозволить отримати точні розрахунки за допомогою сучасних методів розв'язання.

За даними [13] головним джерелом вібрацій у друкарських машинах є друкарські циліндри, що входять до складу офсетного друкарського апарату. Цей блок складається із трьох основних циліндрів, два з яких перебувають у безпосередньому контакті, що створює небажані вібрації. Такі вібрації є основною причиною дефектів, зокрема нерівномірності оптичної щільності відбитка, що значно впливає на якість друку. Результати вимірювання коливань циліндрів у реальних умовах роботи друкарської машини представлені у багатьох дослідженнях, де підкреслюється важливість врахування впливу деформацій

друкарських вузлів. Наприклад, використовуючи метод кінцевих елементів, проведено моделювання поведінки друкарського блоку, яке було описано системою диференціальних рівнянь із параметричними характеристиками. У процесі аналізу встановлено, що основним фактором впливу на роботу друкарського апарату є стисливість шару на циліндрі з резинотканинним полотном, що визначає стабільність фарбоперенесення.

Особливу увагу заслуговує геометрична інтерпретація моделі, яка дозволяє візуалізувати зміни у структурі барвистого шару й виявити закономірності цих змін. Встановлено, що деформація циліндрів не лише є наслідком відхилень від геометричної форми, але й значно впливає на якість друкарського контакту. Попри певні успіхи у вивченні процесів фарбоперенесення, на сьогодні залишається невирішеним завдання повного врахування впливу осьових вібрацій циліндрів та відхилень від їхніх геометричних характеристик на поведінку офсетної друкарської системи у зоні контакту. Для вирішення зазначеної задачі розглядається використання рівнянь Нав'є–Стокса у полярній системі координат, центр якої розташований у точці Q_1 , зі змінними (r, φ) , що відповідає центральній точці одного з друкарських циліндрів. Такий підхід дозволяє детально проаналізувати динаміку роботи друкарського апарату та врахувати вплив змінних характеристик, що впливають на точність суміщення фарб [14]. Як основу для розрахунків використано класичну схему офсетного друкарського апарату, що забезпечує універсальність і надійність отриманих результатів (рис. 2).

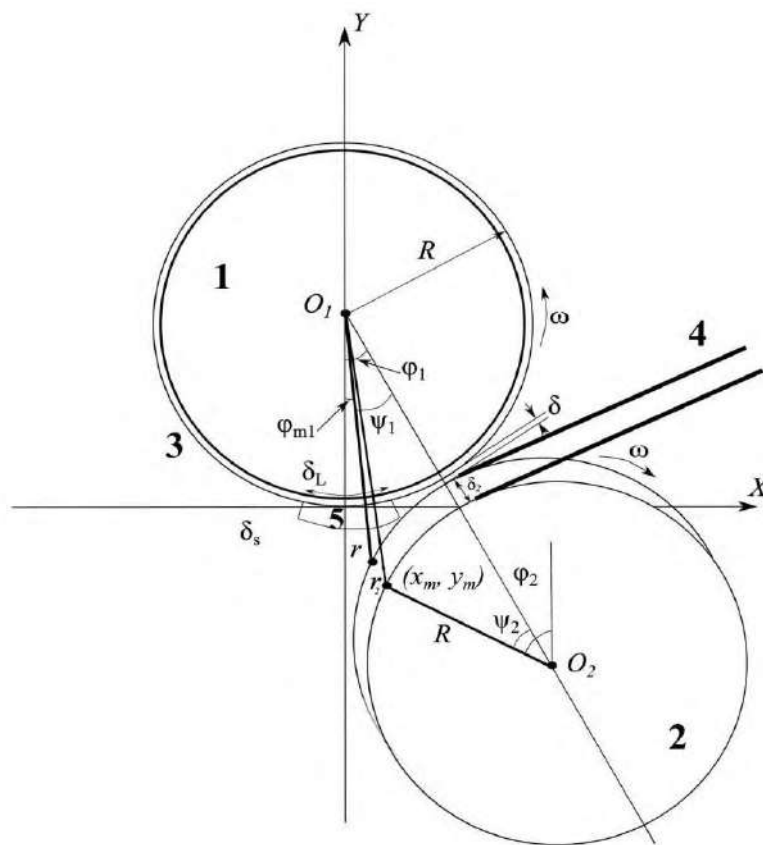


Рис. 2. Фрагмент вузла друкарського апарату рулонної друкарської машини, у якому здійснюється перенесення фарби на носій інформації:

(x_m, y_m) , (x_c, y_c) – координати даної точки та центру циліндра 1 в декартовій системі координат OXY ; φ_0 , φ_{m1} – початкове значення θ для центру циліндра 2 та поточне значення θ точки; φ_1 , φ_2 – кути від двох центрів циліндрів між точкою циліндра 2 та вертикальними напрямками залежно від часу та кутовий швидкості обертання; φ_{m0} – початкове значення φ_2 ; ψ_1 – кут від центру Q_1 між точкою кола циліндра 2 і відрізком, що з'єднує центри циліндрів Q_1 та Q_2 ; ψ_2 – кути відповідної дуги в другому циліндрі
Джерело: розроблено автором.

Алгоритм чисельного моделювання, взятий за основу, для автоматизації розрахунку показників фарбоперенесення (перенесення в'язкої нестисливої рідини) у зоні друкувального контакту має наступну послідовність:

- 1) введення вихідних даних;
- 2) виконання умови адгезії друкарської фарби стосовно сприймаючих поверхонь;
- 3) розрахунок радіальних сил F_r моментів сил M_φ для деформації поверхні.

Обов'язковою щодо дотичних напруг є умова проведення розрахунку з урахуванням дискретної сітки в околиці вузлів (N_i) поверхні циліндрів 1 і 2 та його швидкостей деформації. Сумарні величини по всіх граничних вузлах поверхні циліндра, що стикаються з фарбою, мають вигляд:

$$F_r = \sum_{i=1}^{N_i} F_{ri} \times e_{ri}, M_\varphi \sum_{i=1}^{N_i} M_{ri}. \quad (1)$$

де e_{ri} – одиничний орт для i -го напрямку радіуса вектора біля прикордонного (i, j)-го вузла розрахункової сітки;

- 4) визначення деформацій кордонів;

5) визначення коефіцієнтів фарбоперенесення після переходу в супутню систему координат із перетворенням $\theta = \varphi - \omega t$. У нових змінних (r, θ) з компонентами швидкості (U_r, U_θ) та за наявності кутового прискорення цієї системи зрівняння мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_r}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_\theta R}{r} \frac{\partial U_r}{\partial \theta R} - \frac{(U_\theta + \omega r)^2}{r} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + v \left(\nabla^2 U_r - \frac{U_r}{r^2} - \frac{2R}{r^2} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta R} \right), \\ \frac{\partial U_\theta}{\partial t} + U_r \frac{\partial U_\theta}{\partial r} + \frac{U_\theta R}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta R} + \frac{U_r U_\theta}{r} + 2U_r \omega + \varepsilon r &= -\frac{1}{\rho} \frac{R}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta R} + v \left(\nabla^2 U_\theta - \frac{U_\theta}{r^2} + \frac{2R}{r^2} \frac{\partial U_r}{\partial \theta R} \right), \\ \frac{\partial U_r}{\partial t} + \frac{U_r}{r} + \frac{R}{r} \frac{\partial U_\theta}{\partial \theta R} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де $\nabla^2 V = \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{R^2}{r^2} \frac{\partial^2 U}{(\partial \theta R)^2}$ – оператор Лапласа,

v – кінематична в'язкість,

ρ – густина рідини,

P – тиск,

φ – кутова швидкість обертання.

Для представлення результатів моделювання аналізованої системи надалі використовуватиметься перехід до інших координат $(x, y) = (R_0 \theta, R_0 - r)$.

Припускаємо, що поверхні циліндрів 1 і 2 мають спотворення по радіусах у деяких сегментах кола та їхні радіуси можна подати у вигляді:

$$R_1(\theta) = R_0 + \alpha_1 \theta + \beta_1 \theta^2 + \gamma_1, \theta \in (\theta_1, \theta_2); \quad (3)$$

$$R_2(\theta) = R_0 + \alpha_2 \theta + \beta_2 \theta^2 + \gamma_2, \theta \in (\theta_1, \theta_2), \quad (4)$$

де θ_2 – кут звіту поверхні циліндра 2 з урахуванням того, що точка $\theta_2 = 0$ стикається з початком координат при наступному контакті [15].

За умови, що $t = 0$ координати (r, θ) для області друкарської фарби Ω в супутній системі обираються в межах:

$$\begin{aligned} r &\in [R, R + \delta_s], \\ \theta &\in \left[\frac{-\delta_L}{(2R)}, \frac{\delta_L}{(2R)} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

По всій області:

$$U_r(r, \theta) = 0; U_\theta(r, \theta) = 0. \quad (6)$$

Координати початкової точки зіткнення з циліндром:

$$2 - \left(\frac{R_1 + \delta_s, \delta_L}{2R_0} \right). \quad (7)$$

Для неї компоненти швидкості визначаються за формулами групи (8) з умов адгезії та вбирання фарби:

$$\begin{aligned} V_\theta &= V_x \cos(\varphi_{m1}) + V_y \sin(\varphi_{m1}) \\ V_r &= V_x \sin(\varphi_{m1}) - V_y \cos(\varphi_{m1}) \end{aligned} \quad (8)$$

для яких

$$\begin{aligned} x_m &= x_c + (2R_0 + R_2 + \delta) \sin(\varphi_1) - r \sin(\varphi_2), \\ y_m &= y_c - (2R_0 + R_2 + \delta) \cos(\varphi_1) + r \cos(\varphi_2), \\ V_x &= -\omega + (2R_0 + R_2 + \delta) \cos(\varphi_1) - 2\omega r \cos(\varphi_2), \\ V_y &= -\omega + (2R_0 + R_2 + \delta) \sin(\varphi_1) + 2\omega r \sin(\varphi_2), \\ \varphi_1 &= \varphi_0 - \omega t, \quad \varphi_2 = \varphi_{m0} - 2\omega t. \end{aligned} \quad (9)$$

Виходячи з того, що рух центру циліндра 2 навколо циліндра 1 здійснюється з кутовою швидкістю ω , а навколо свого центру – з 2ω в протилежному напрямку. У супутній системі координати точок кола радіуса R для циліндра 2, центр якого O_2 , знаходиться на відстані $(2R_0 + R_2 + \delta)$ від $O_1 - (r_2, \omega_1)$ і мають вигляд:

$$r_2 = \sqrt{R_2^2 \sin^2 \varphi_2 (2R_0 + \delta - R_2 \cos \varphi_2)^2}. \quad (10)$$

$$\psi_1 = \arcsin \left(\frac{\sin \psi_2}{\sqrt{1 + 4 \frac{R_0^2}{R_2^2} + \frac{\delta^2}{R_2^2} + 4 \frac{R_0 + \delta}{R_2^2} - 2 \left(2R_0 + \frac{\delta}{R_2} \right) \cos \psi_2}} \right). \quad (11)$$

У полярній системі координат (r, θ) визначаються координати для точок (x_m, y_m) , по кутах (φ_1, φ_2) для змінних положень з часом.

Далі $\psi_2 = \varphi_2 - \varphi_1$ згідно з формулами (10) та (11) визначається r і ψ_1 . Тоді $\theta = \varphi_{m1} = \varphi_1 - \psi_1$ за умови, що радіуси циліндрів 1 і 2 будуть рівні між собою.

Розглянемо вплив вібрацій осей циліндрів на прикладі вібрації вісі циліндра 2. Для цього розглядатимемо зміну відстані між центрами циліндрів за часом з $2R + \delta$ до $2R + \delta_2$, де δ_2 представимо у вигляді осцилювання за таким законом з амплітудою a і частотою ν :

$$\delta_2 \delta + a \times \sin(2\pi \nu t). \quad (12)$$

При зміні величини відстані між центрами циліндрів при підборі фарби необхідно враховувати величину r_2 замість величини r (див. рис. 2.), що призводить до зміни значень для ψ_1, m_1 , які перераховуються згідно з формулами (10), (11). При цьому зміна інших величин, як ψ_2 та φ_1 буде представлятися в колишньому вигляді за наведеними вище формулами.

Отже, досягнення високої точності суміщення фарб у рулонних друкарських машинах є багатогранним завданням, яке вимагає комплексного підходу до проектування, експлуатації та постійного вдосконалення конструктивних рішень, що забезпечує виробництво продукції, яка відповідає найвищим стандартам якості.

Висновки. За результатами дослідження ідентифіковано основні конструктивні особливості механічних приводів рулонних друкарських машин, які мають вирішальний вплив на забезпечення високої точності суміщення фарб у процесі багатобарвного друку. Серед таких особливостей ключовими є геометрична точність виготовлення механічних вузлів, оптимальна жорсткість конструкції приводу, а також здатність системи зводити до мінімуму вібрації, що виникають у виконавчих механізмах під час роботи.

У межах дослідження теоретична модель руху стрічкопровідних елементів друкарських машин, яка враховує вплив динамічних навантажень, геометричних деформацій і конструктивних характеристик механічного приводу. Модель, представлена у вигляді системи рівнянь, забезпечує можливість точного прогнозування поведінки друкарських систем і дозволяє оптимізувати процес фарбоперенесення з метою досягнення найкращих результатів у багатобарвному друці. Також було запропоновано впровадження гібридних систем приводів, які передбачають інтеграцію механічних і електронних компонентів для значного підвищення точності суміщення фарб. Крім цього, рекомендовано модернізацію існуючих систем приводів шляхом використання алгоритмів чисельного моделювання, що сприятиме автоматизації процесу фарбоперенесення і забезпечить стабільність роботи друкарських машин навіть у складних умовах експлуатації.

Список використаних джерел

1. Морфлюк В. Ф. (2014). Дослідження моделей динаміки друкарських апаратів / В. Ф. Морфлюк. *Вісник КПІ*, 1(43), 50-53.
2. Seshadri, Pagilla A. P., Lynch J. (2013). Modeling Print Registration in Roll-to-Roll Printing Presses. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, (135), 031016. <https://doi.org/10.1115/1.4023761>.
3. Young Min Lee [et al.]. (2016). The influence of distortion on enhancing the registration accuracy in roll-to-roll printing processes. *Macromolecular Research*, 24(12), 1062-1069. <https://doi.org/10.1007/s13233-016-4149-7>.
4. Makedon, V. [et al.]. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
5. Bălan, Emilia [et al.]. (2021). Preventive maintenance features specific to offset printing machines. *MATEC Web of Conferences*, 343, 08012. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134308012>.
6. Казьмірович, Р. В., Казьмірович, О. Р. (2014). Удосконалення методу контролю точності суміщення та позиціонування фарбовідбитків на аркушевих друкарських машинах. *Наукові записки [Української академії друкарства]*, (3), 95-102.
7. Bangchao, Liu [et al.]. (2023). Industrial Roll-to-Roll Printing Register Control Using a Pulse-Width Subdivision Detection Algorithm. *Applied Sciences*, 13(9), 5307. <https://doi.org/10.3390/app13095307>.
8. Петрук, А. І., Черня, Б. О., Моргун, О. Я. (2008). Навантаження приводу великоформатних ниткозшивних машин та шляхи їх зменшення. *Технологія і техніка друкарства*, 2, 94-99.
9. Thanh, Huy Phung [et al.]. (2023). Machine learning approach to monitor inkjet jetting status based on the piezo self-sensing. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45445-0>.
10. Македон, В. В., Холод, О. Г., Ярмоленко, Л. І. (2023). Модель оцінки конкурентоспроможності високотехнологічних підприємств на засадах формування ключових компетенцій. *Академічний огляд*, (2(59)) 75-89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5.
11. Marja, K. Välimäki [et al.]. (2022). Accuracy control for roll and sheet processed printed electronics on flexible plastic substrates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(9-10), 6255-6273. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08717-z>.

12. Киричок, П. О., Морфлюк, В. Ф., Олійник, В. Г. (2008). Температурна стабілізація процесів суміщення фарб у рулонних друкарських машинах. *Технологія і техніка друкарства*, (2(20)), 158-164. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(20\).2008.60519](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(20).2008.60519).
13. Sandeep, Suresh Babu [et al.]. (2022). Recent developments in the application of machine-learning towards accelerated predictive multiscale design and additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1). <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2141653>.
14. Македон, В. В., Байлова, О. О. (2023). Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Економічні науки*, 47, 16-26. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3>.
15. Mohammad, Hossein Nikooharf [et al.]. (2024). Machine learning in polymer additive manufacturing: a review. *International Journal of Material Forming*, 17(6), <https://doi.org/10.1007/s12289-024-01854-8>.

References

1. Morflyuk, V. F. (2014). Doslidzhennya modeley dynamiky drukarskykh apparatov [Research of dynamic models of printing apparatuses]. *Visnyk KPI – Bulletin of Kyiv Polytechnic Institute*, 1(43), 50–53.
2. Seshadri, Aravind, & Pagilla, Prabhakar & Lynch, Jamie. (2013). Modeling Print Registration in Roll-to-Roll Printing Presses. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 135, 031016. <https://doi.org/10.1115/1.4023761>.
3. Lee, Y., Kim, O., Choi, D., Yu, J.-W. (2016). The influence of distortion on enhancing the registration accuracy in roll-to-roll printing processes. *Macromolecular Research*, 24, 1062–1069. <https://doi.org/10.1007/s13233-016-4149-7>.
4. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunencko, N., Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
5. Bălan, E., Berculescu, L., Răcheru, R.-G., Pițigoi, D. V., & Adăscălița, L. (2021). Preventive maintenance features specific to offset printing machines. *MATEC Web of Conferences*, 343, 08012. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134308012>.
6. Kazmirovych, R.V., Kazmirovych, O.R. (2012). Udoskonalennya metodu kontrolyu tochnosti sumishchennya ta pozytsionuvannya farbovidbytiv na arkushevykh drukars'kykh mashynakh [Improvement of the method for controlling the accuracy of alignment and positioning of printed images on sheet-fed printing machines]. *Naukovi zapysky Ukrayinskoyi akademiyi drukarstva – Scientific Notes of the Ukrainian Academy of Printing*, 2(58), 110–115.
7. Liu, B., Chen, Y., Xie, J., & Chen, B. (2023). Industrial Roll-to-Roll Printing Register Control Using a Pulse-Width Subdivision Detection Algorithm. *Applied Sciences*, 13(9), 5307. <https://doi.org/10.3390/app13095307>.
8. Petruk, A.I., Chernya, B.O., Morhun, O.Ya. (2008). Navantazhennya pryvodu velykoformatnykh nytkozshyvnykh mashyn ta shlyakhy yikh zmenshennya [Loads on the drive of large-format thread-sewing machines and ways to reduce them]. *Tekhnolohiya i tekhnika drukarstva – Technology and Techniques of Printing*, 2(20), 94–99.
9. Phung, T.H., Park, S.H., Kim, I., Lee, T.-M., & Kwon, K.-S. (2023). Machine learning approach to monitor inkjet jetting status based on the piezo self-sensing. *Scientific Reports*, 13, 18089. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45445-0>.
10. Makedon, V. V., Kholod, O. H., Yarmolenko, L. I. (2023). Model otsinky k10. onkurentospro-mozhnosti vysokotekhnolohichnykh pidpryyemstv na zasadakh formuvannya klyuchovykh kompetentsiy [The model of assessing the competitiveness of high-tech enterprises based on the formation of key competencies]. *Akademichnyy ohlyad – Academic review*, 2(59), 75-89. DOI: 10.32342/2074-5354-2023-2-59-5.
11. Välimäki, M.K., Jansson, E., Von Morgen, V.J.J., Ylikunnari, M., Väisänen, K.-L., Ontero, P., Kehusmaa, M., Korhonen, P., & Kraft, T. M. (2022). Accuracy control for roll and sheet processed printed electronics on flexible plastic substrates. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(9-10), 6255–6273. DOI: 10.1007/s00170-022-08717-z.

12. Kyrychok, P.O., Morflyuk, V.F., Oliynyk, V.H. (2008). Temperaturna stabilizatsiya protsesiv sumishchennya farb u rulonnykh drukarskykh mashynakh [Temperature stabilization of color registration processes in roll-fed printing machines]. *Tekhnolohiya i tekhnika drukarstva – Technology and Techniques of Printing*, 2(20), 158–164. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(20\).2008.60519](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(20).2008.60519).

13. Babu, S.S., Mourad, A.H.I., Harib, K.H., & Vijayavenkataraman, S. (2022). Recent developments in the application of machine-learning towards accelerated predictive multiscale design and additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1). <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2141653>.

14. Makedon, V.V., Bailova, O.O. (2023). Planuvannya i orhanizatsiya vprovadzhennya syfrovyykh tekhnolohiy v diyalnist promyslovykh pidpryyemstv [Planning and organizing the implementation of digital technologies in the activities of industrial enterprises]. *Scientific Bulletin of Kherson State University. Series "Economic Sciences"*, 47, 16-26. DOI: 10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3.

15. Nikooharf, M.H. et al. (2024). Machine learning in polymer additive manufacturing: a review. *International Journal of Material Forming*, 17. DOI: 10.1007/s12289-024-01854-8.

Отримано 07.01.2025

UDC 681.62:621.791.92

Mykola Zenkin¹, Oleksandr Shvedchenko²

¹Doctor of Sciences in Engineering, Professor

Professor of the Department of Printing Machines and Automated Complexes

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: nikolay_zenkin@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8840-0572>. ResearcherID: [AHB-4549-2022](https://orcid.org/0000-0002-8840-0572)

²Postgraduate Student of the Department of Printing Machines and Automated Complexes

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: shvedchenko.sasha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3649-1276>

THE INFLUENCE OF DESIGN FEATURES OF MECHANICAL DRIVES OF ROLL-WRAP PRINTING MACHINES ON THE ACCURACY OF COLOR REGISTRATION

The article presents a detailed study of the design features of mechanical drives of roll-wrap printing machines and their influence on the accuracy of color matching in multi-color printing, which is a critical factor in ensuring high quality printed products. The study analyzed the key factors that affecting the stability of printing machines, in particular, the dynamic characteristics of mechanical drives, geometric deformations of printing unit components, as well as the level of vibration generated in actuators during operation. The work identified the main sources of printing defects caused by insufficient accuracy of ink matching due to structural defects of mechanical drives, and assessed the impact of low-frequency vibrations and thermal-mechanical deformations on the stability of printing systems, which allowed us to identify the main areas for improving drive designs to increase their efficiency. On the basis of the results obtained, the need for a theoretical model of the movement of the conveyor elements, taking into account the dynamic characteristics, the geometric features of the drive designs and their impact on the accuracy of the ink transfer process, has been demonstrated. The work developed a system of differential equations that allows not only to predict the behavior of printing systems under various conditions, but also to optimize their operation in accordance with modern requirements of the printing industry. The introduction of hybrid drive systems that combine mechanical and electronic components is proposed, which contributes to a significant reduction in the level of vibrations and an increase in the accuracy of ink matching. In addition, it is recommended to modernize existing drive systems using numerical modeling algorithms, which will allow automating the ink transfer process and ensuring stable operation of printing machines in a wide range of modes. The results of the study provide a scientifically sound basis for further improvement of the designs of web-fed printing machines, which will contribute to improving the quality of printed products in accordance with modern requirements and industry standards.

Keywords: web-fed printing machines; mechanical drives; ink matching accuracy; vibrations and oscillations; ink transfer; design optimization.

Fig.: 2. References: 15.

**Іван Іванович Регей¹, Олег Богданович Книш², Ростислав Олегович Книш³,
Андрій Михайлович Терновий⁴, Ігор Олександрович Романчук⁵**

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютеризованих комплексів
поліграфічних та пакувальних виробництв

Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: Ivan.I.Rehei@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3395-2994>

Scopus Author ID: 57209409155

²доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютеризованих комплексів
поліграфічних та пакувальних виробництв

Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: Oleh.B.Knysh@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5854-1879>

Scopus Author ID: 57209411556

³аспірант кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: Rostyslav.O.Knysh@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4005-5502>

⁴аспірант кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: Andrii.M.Ternovyi@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8933-6115>

⁵асистент кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: Ihor.O.Romanchuk@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8598-1054>

АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ЛІНІЙНОГО ЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРА МАСИ НАТИСКНОГО СЕГМЕНТА В ПРОЦЕСІ ШТАНЦЮВАННЯ РОЗГОРТOK КАРТОННОГО ПАКОВАННЯ

Виготовлення розгорток картонних пакувань здійснюється на штанцювальних пресах. Для зменшення технологічних навантажень при штанцюванні пропонується пресова пара «натискний сегмент – опорна плита». Обґрунтовано актуальність дослідження умов функціонування преса із сегментним натискним засобом. Наведено аналітичні залежності для геометричного синтезу пресової пари при різних значеннях відносного радіуса сегмента. Встановлено кількісні та якісні характеристики зміни відносних горизонтального та вертикального переміщень центра мас сегмента. Визначено умову при якій відносна ширина сегмента займає горизонтальне положення.

Ключові слова: картонне пакування; штанцювальний прес; сегмент; центр маси; механізм; кривошип; опорна плита; відносне переміщення.

Рис.: 3. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Для продукування картонної тари на підприємствах поліграфічної галузі широко задіяні технології та техніка додрукарського, друкарського та післядрукарського секторів. Останній сектор, серед іншого, представлений штанцювальним обладнанням, призначеним для виготовлення картонних розгорток із заготовок в автоматичному режимі. Особливість його функціонування пов'язана з переборюванням значних технологічних навантажень через одночасний контакт усіх висікальних та бігувальних інструментів форми з оброблюваним матеріалом. Як результат, штанцювальне обладнання метало- та енергомістке. Водночас великотиражне значною мірою доповнює середньотиражне виробництво картонної тари з обмеженим парком сучасного штанцювального обладнання. Завдання дослідження умов функціонування пропонованих малоформатних пресів з обмеженим контактом пресової пари актуальне для обґрунтування конструкції пресів нового покоління для середньотиражного виробництва картонної тари.

Постановка проблеми. Загальне споживання паперу та картону у 2023 році, як свідчать дані Конфедерації європейської паперової промисловості, що об'єднує національні асоціації 18 країн, становило 62,7 млн т, у тому числі 38,7 млн т – пакувального [1]. Попит на пакування з картону, що спостерігається в наш час, зріс передусім через прагнення споживачів зменшити свій вплив на довкілля та відмовитися від «полімерних матеріалів на користь екологічніших альтернатив» [2].

Продуктування картонних паковань за технологічним процесом базується на штанцюванні їхніх розгортки на спеціальних пресах у складі автоматичного обладнання. Вони укомплектовані нерухомою плитою зі штанцювальною формою та натискною, яку приводять у рух розклинювальні важільні чи ексцентриккові механізми [3]. Такі механізми забезпечують натискній плиті вертикальне переміщення у протилежних напрямках. Рух її в одному з напрямів потрібен для реалізації вільного переміщення через робочу зону преса кареток з картонними заготовками, а у протилежному – для силової взаємодії інструментів штанцювальної форми з картоном. Основною проблемою функціонування таких пресів є переборювання натискною плитою значних технологічних опорів. Це спричинено одночасним контактом інструментів штанцювальної форми з картонною заготовкою по всій її площині. Для вирішення цієї проблеми пропонується мінімізувати площину контакту натискного засобу з картонною заготовкою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Удосконаленню штанцювальних пресів присвячені ряд наукових праць. Для приводу натискної плити автори у праці [4] пропонують комплектувати штанцювальні преси пневмоциліндрами. Зазначено, що їх використання уможливило реалізацію технологічного процесу штанцювання розгортки з картону. Як стверджують автори, працездатність пневмоприводу з відносно низьким робочим тиском базується на інерційно-швидкісних властивостях поршня. Автори праці на базі виконаних досліджень стверджують, що заміна приводів натискної плити з використанням циклових механізмів на пневматичні зменшить вібраційні навантаження на прес та спростить його загальну конструкцію. Беручи до уваги, що штанцювальні преси належать до категорій важконавантаженого (через циклічне переборювання значних технологічних опорів) та високопродуктивного обладнання, висновок щодо реального використання пневмоприводів у штанцювальному обладнанні варто отримати за результатами комплексних досліджень, у тому числі й експериментальних.

У праці [5] запропоновано пікове силове навантаження у штанцювальному пресі мінімізувати почерговою обробкою картонних заготовок окремими секціями натискної плити. Автори дослідили вплив товщини картону на кутове зміщення ексцентриків у приводі секційних розклинювальних механізмів. У праці зазначено, що впровадження побудови натискної плити з окремих секцій вирішує важливу задачу мінімізації метало- та енергомісткості штанцювального обладнання. Разом з тим варто зазначити, що секційна побудова натискної плити значно ускладнює як її конструкцію та привод розклинювальних механізмів, так і утруднює його налагоджування через часту зміну товщини картонних заготовок.

Нову перспективну схему штанцювального обладнання запропоновано у праці [6]. У ній автори виконали геометричний синтез плоскоциліндрового преса, призначеного для виготовлення розгортки пакування з листового картону. Засобом створення тиску обрано циліндр, який перекошується уздовж штанцювальної форми, на яку почергово подають картонні заготовки та виводять відштанцьовані листи. Переваги застосування такого обладнання полягають у спрощенні конструкції його приводу, зменшенні металомісткості. Зважаючи на те, що діаметр циліндра значно менший за довжину штанцювальної форми, можна передбачити, що він спричинюватиме згинальну дію на її інструменти. Результат такої дії може проявлятися у зсуві картонної заготовки відносно форми та погіршенні якості відштанцьованих розгортки.

Дослідники у праці [7] поділилися результатами застосування технології комп'ютерного моделювання для оптимізації механізмів у напівавтоматичних штанцювальних пресах. Автори дійшли висновку, що її використання значно скорочує цикл інженерного проектування та здешевлює виробництво пресів з одночасним підвищенням продуктивності механізмів. Як стверджують дослідники, комп'ютерне моделювання сприяє ідентифікуванню та усуненню слабких місць конструкції ще на стадії проектування. Проте результати дослідження не стосуються практичних аспектів мінімізації силового навантаження приводу штанцювальних пресів та їхньої металомісткості.

У праці [8] автори дослідили найбільш навантажений вузол плоскоциліндрового штанцювального преса – привод засобу створення тиску. Для виконання розрахунків залучено методику інваріантної форми. За результатами розрахунків автори засвідчили наявність короточасного піку моменту сили на приводному валу від переборювання технологічного опору штанцювання та інерційних навантажень. Дослідники стверджують, що пропонований механізм привода натискного циліндра сприяє мінімізації енерго- та металомісткості преса, спрощенню його конструкції. Разом з тим варто зазначити, що застосування плоскоциліндрового штанцювального преса у виробничих умовах не поширене. Крім того, перекочування циліндра по картонній заготовці від хвостового (незафіксованого) боку до переднього сприятиме її зсуву відносно інструментів штанцювальної форми.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Наявна у відкритому доступі наукова інформація з дослідження та удосконалення механізмів привода засобів створення тиску у штанцювальних пресах зосереджена на двох напрямках. Перший – удосконалення механізму привода натискної плити в плоских штанцювальних пресах. Другий – зменшення технологічних навантажень шляхом мінімізації площі контакту в парі натискний засіб – опорна плита. У цьому випадку для виконання технологічної операції штанцювання переобладнаних плоскодрукарських машин не знайшло ефективного застосування на практиці. Це пояснюється використанням натискного циліндра відносно малого діаметра, що спричинює згинання висікальних лінійок та зміщення картонної заготовки. Застосування натискного сегмента великого діаметра певною мірою вирішує ці проблеми. Проте недослідженою залишається задача позиційного технічного контролю положення його центра маси в процесі штанцювання картонних заготовок, що потребує дослідження характеру його переміщення.

Мета статті – обґрунтувати особливості геометричного налаштування кривошипно-зубчастого механізму привода каретки, дослідити зміщення центра маси натискного сегмента різних відносних геометричних розмірів в процесі штанцювання картонних заготовок, необхідного для профілювання технічного засобу, що контролює його положення в процесі переміщення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досліджень скористаємось схемою кривошипно-зубчастого механізму привода натискного сегмента (рис. 1). Тут прийнято наступні позначення: КЗ – картонна заготовка, 1 – станина, 2 – опорна плита з плоскою штанцювальною формою, 3 – зубчаста пара «нерухома рейка – колесо», 4 – натискний сегмент, 5 – нерухома рейка, 6 – каретка з рухомою рейкою. Будова та принцип роботи механізму описано у статті [9].

Для геометричного аналізу переміщення центра мас сегмента, з урахуванням стандартного формату штанцювального преса 760×560 мм, в «одиничному» механізмі прийнято наступні позначення відносних геометричних розмірів: $L_i = 1,0$ – ширина опорної плити 2 з плоскою штанцювальною формою; $\lambda_1 = 0,25$ – довжина кривошипа; $\lambda_2 = 0,5$ – довжина шатуна; $\lambda_r = 0,5$ – радіус зубчастого колеса [9].

Для знаходження положення кривошипа, при якому натискний сегмент проходить половину шляху, скористаємось виразом [9]:

$$S_{Bi} = \lambda_2 \cdot \cos \left(\arcsin \frac{\lambda_1 \cdot \sin \varphi}{\lambda_2} \right) - \lambda_1 \cdot \cos \varphi - S_{\min}, \quad (1)$$

де $S_{\min} = \lambda_2 - \lambda_1$.

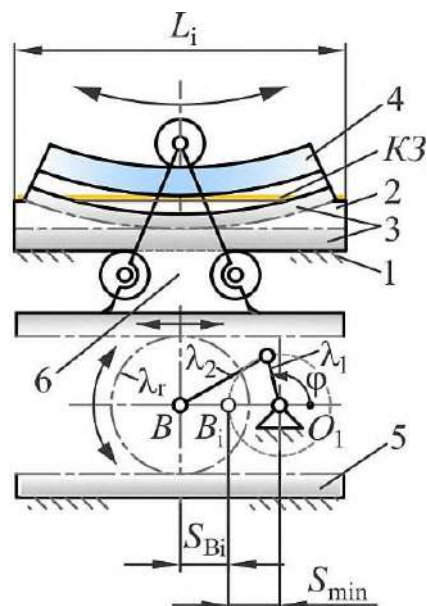


Рис. 1. Схема кривошипно-зубчастого механізму привода сегментного натискного засобу у штанцювальному пресі

Джерело: розроблено авторами.

Вираз (1), з врахуванням обернених тригонометричних функцій [10], набуває вигляду:

$$\sqrt{\lambda_2^2 - \lambda_1^2 \cdot \sin^2 \varphi} = S_{Bi} + \lambda_1 \cdot \cos \varphi + S_{min}. \quad (2)$$

Після перетворень (2), отримуємо залежність:

$$2(S_{Bi} + S_{min})\lambda_1 \cdot \cos \varphi = \lambda_2^2 - \lambda_1^2 - (S_{Bi} + S_{min})^2, \quad (3)$$

розв'язком якої є вираз:

$$\varphi = \arccos \left[\frac{\lambda_2^2 - \lambda_1^2}{2\lambda_1(S_{Bi} + S_{min})} - \frac{S_{Bi} + S_{min}}{2\lambda_1} \right]. \quad (4)$$

Для випадку $S_{Bi} = 0,25$ і $S_{min} = 0,25$ кут повороту кривошипа дорівнює $\varphi = 104,48^\circ$.

Для дослідження переміщення центра O_c маси натискного сегмента вздовж осей Ox та Oy (рис. 2) скористаємося виразами [11]:

$$x = \lambda_R \cdot \gamma_c - \lambda_h \cdot \sin \gamma_c, \quad (5)$$

$$y = \lambda_R - \lambda_h \cdot \cos \gamma_c, \quad (6)$$

де λ_R – відносний зовнішній радіус натискного сегмента, λ_h – відносний радіус центра його маси, γ_c – поточний кут повороту натискного сегмента відносно вертикальної осі.

Значення λ_h знаходимо за алгоритмом [11]:

$$\alpha = \frac{L_i}{\lambda_R}; \rightarrow c_i = 2\lambda_R \cdot \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right); \rightarrow S_i = \frac{1}{2} \lambda_R^2 (\alpha - \sin \alpha); \rightarrow \lambda_h = \frac{c_i^3}{12S_i},$$

де α – центральний кут натискного сегмента; $L_i = 1,0$ – відносна ширина опорної плити з плоскою штанцювальною формою; c_i – відносна ширина натискного сегмента; S_i – його відносна площа.

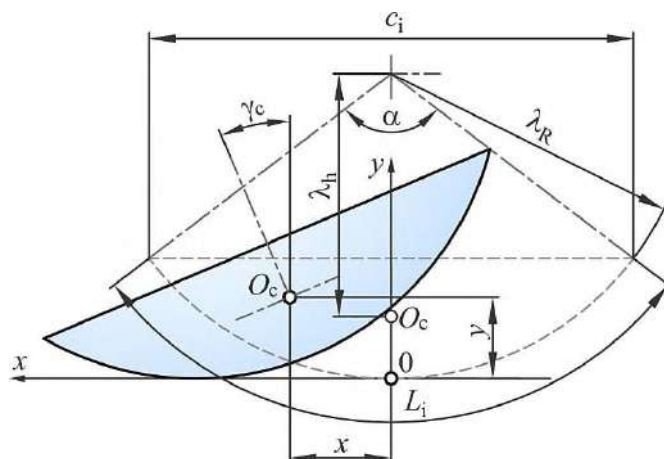
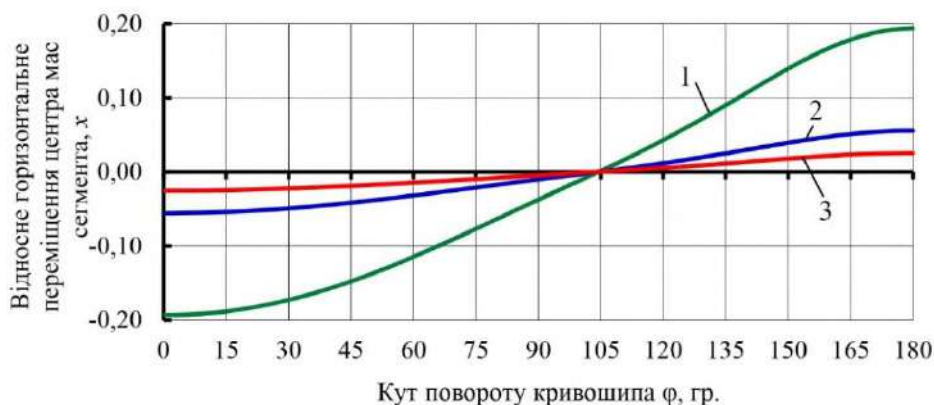


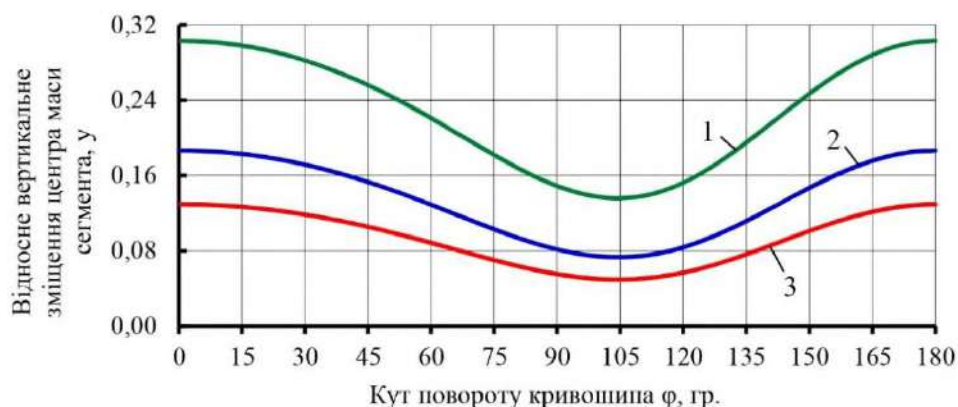
Рис. 2. Розрахункова схема до визначення переміщення центра маси натискного сегмента

Джерело: розроблено авторами.

За результатами розрахунків для $\lambda_R = 0,5; 1,0$ і $1,5$ отримані значення відносного радіуса центра O_c маси натискних циліндрів $\lambda_h = 0,364; 0,927$ і $1,451$. Результати розрахунку відносного горизонтального і вертикального переміщення центра мас натискного сегмента зображені на рис. 3, а, б.



а



б

Рис. 3. Графіки залежностей відносних переміщень центра маси натискного сегмента: горизонтального (а) та вертикального (б) від кута повороту кривошипа для відносного зовнішнього радіуса λ_R сегмента: 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 1,5

Джерело: розроблено авторами.

Як видно із рис. 3, а, горизонтальна складова x переміщення центра O_c маси змінюється з від'ємного до додатного значення. Зміна знаку відбувається при значенні $\varphi = 104,48^\circ$, коли відносна ширина c_i сегмента займає горизонтальне положення. Несиметричність від'ємного та додатного циклів горизонтального переміщення центра маси сегмента пояснюється прийнятими геометричними параметрами кривошипно-зубчастого механізму. Максимальні значення відносного горизонтального переміщення спостерігаються при відносному радіусу сегмента $\lambda_R = 0,5$. Відповідно мінімальні – при $\lambda_R = 1,5$. Це пояснюється необхідністю більшого кутового переміщення γ_c сегмента вздовж опорної плити форматом $L_i = 1,0$ у першому випадку при малому радіусі, ніж при більшому радіусі в другому випадку.

За результатами досліджень зміни вертикальної складової у переміщення центра маси сегмента (рис. 3, б) констатуємо наступне. Як і у випадку горизонтальної складової переміщення, максимальні значення спостерігаються для відносного радіуса сегмента $\lambda_R = 0,5$, а мінімальні – при $\lambda_R = 1,5$. Для кожного з досліджуваних випадків мінімальні значення відносного вертикального переміщення спостерігаються при значенні кута повороту кривошипа $\varphi = 104,48^\circ$. Це логічно, оскільки, як відзначалось вище, у цьому положенні відносна ширина c_i сегмента займає строго горизонтальне положення. Також це корелюється зі зміною знаку горизонтальної складової переміщення з від'ємного на додатній. Щодо максимальних значень координати у переміщення центра мас, то вони спостерігаються у крайніх положеннях сегмента при куті повороту кривошипа $\varphi = 0^\circ$ та $\varphi = 180^\circ$.

Висновки. Запропоновано зменшити технологічні навантаження у пресовій парі шляхом мінімізації площі контакту між натискним засобом та опорною плитою застосуванням натискного сегмента. Для аналітичних досліджень використано схему кривошипно-зубчастого механізму привода натискного сегмента в «одиничній» формі. У процесі перекочування натискного сегмента по плоскій штанцювальній формі з картонною заготовкою його центр маси циклічно зміщується відносно локальної зони штанцювання, що навантажує каретку згинальним моментом сили у її крайніх положеннях.

За результатами аналітичних досліджень встановлено, що горизонтальна складова переміщення центра маси натискного сегмента змінюється з від'ємного до додатного значень. Зміна знаку відбувається для $\varphi = 104,48^\circ$ кута повороту кривошипа, при якому сегмент займає горизонтальне положення. Максимальне значення відносного горизонтального переміщення становить 0,193 і отримано для відносного радіуса $\lambda_R = 0,5$ сегмента, а максимальне для $\lambda_R = 1,5$ – 0,025. Це пояснюється збільшенням кутового переміщення натискного сегмента вздовж опорної плити.

Отримані аналітичні результати дослідження будуть використані для профілювання додаткового технічного засобу каретки, призначеного для забезпечення контрольованого положення центра маси натискного сегмента в процесі штанцювання картонних заготовок, що зменшить вплив на каретку згинального моменту сили ваги сегмента у крайніх положеннях.

Список використаних джерел

1. Маркетологи інформують... Папір та картон Європи у 2023 р. (2024). *Упаковка*, 5, 24-26.
2. Легейда, Д. А. (2024). Сталий розвиток у виробництві пакетів. *Упаковка*, 5, 36-37.
3. Четербух, О. Я., Шахбазов, Я. О., Терницький, С. В. (2024). Аналіз механізмів привода натискної плити плоских штанцювальних пресів. *Наукові записки*, 1(68), 238-246.
4. Ivanko, A. I., Kolinko, I.O. (2023). Designing the pressing plate mechanism of the flat die-cutting press. *Технологія і техніка друкарства*, 1(79), 77-90.
5. Регей, І. І., Влах, В. В., Михайлів, Ю. Ю. (2024). Прес штанцювального обладнання: перспективи заміни моноблочної конструкції натискної плити на секційну. *Упаковка*, (1), 38-40.

6. Шустикевич, А. І., Коломієць, А. Б., Голдак, Л. Б. (2024). Метричний синтез штанцювальної машини плоскоциліндрового типу із оптимізованою компоновальною схемою. *Поліграфія і видавнича справа*, 1(87), 165-173.
7. Song, Rong, Jian Zhong Chu, Bai Zhong Wu. (2011). Semi-Automatic Platen Die-Cutting Mechanism's Optimization Design Based on CAE Technology. *Advanced Materials Research*, 338, 223-226. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.338.223>.
8. Топольницький, П. В., Шустикевич, А. І., Коломієць, А. Б., Ватуляк, Ю. В. (2024). Дослідження параметрів привода натискного циліндра штанцювальної машини плоскоциліндрового типу. *Наукові записки*, 2(69), 140-150.
9. Регей, І. І., Книш, Р. О., Терновий, А. М. (2023). Геометричний синтез та дослідження кінематичних параметрів штанцювального преса з натискним сегментом. *Поліграфія і видавнича справа*, 2(86), 163-173.
10. Шинкарика, М. І. (2003). Вища математика : підручник / за ред. Тернопіль : Вид-во Карп'юка.
11. Березін, Л. М. [та ін.]. (2021). Теоретична механіка. Частина 1. Статика, кінематика : навч. посіб. Київ : Університет «Україна».

References

1. Marketolohy informuiut... Papir ta karton Yevropy u 2023 r. [Marketers inform... Paper and cardboard in Europe in 2023]. (2024). *Upakovka – Packaging*, 5, 24-26.
2. Leheida, D. A. (2024). Stalyi rozvytok u vyrobnytstvi paketiv [Sustainable development in packaging production]. *Upakovka – Packaging*, 5, 36-37.
3. Cheterbukh, O. Ya., Shakhbazov, Ya. O., Ternytskyi, S. V. (2024). Analiz mekhanizmiv pryvoda natysknoi plyty ploskykh shtantsiuvalnykh presiv [Analysis of the pressure plate drive mechanisms of flat die-cutting presses]. *Naukovi zapysky – Scientific notes*, 1(68), 238-246.
4. Ivanko, A. I., Kolinko, I. O. (2023). Designing the pressing plate mechanism of the flat die-cutting press. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva – Technology and Technique of Typography*, 1(79), 77-90.
5. Rehei, I.I., Vlach, V.V., Mykhailiv, Yu.Iu. (2024). Pres shtantsiuvalnoho obladnannia: perspektyvy zaminy monoblochnoi konstruktsii natysknoi plyty na sektsiinu [Die-cutting press equipment: prospects for replacing the monoblock design of the pressing plate with a sectional one] *Upakovka – Packaging*, 1, 38-40.
6. Shustykevych, A.I., Kolomiets, A.B., Holdak, L.B. (2024). Metrychnyi syntez shtantsiuvalnoi mashyny ploskotsylindrovoho typu iz optymizovanoiuiu komponuvalnoiui skhemoiui [Metric synthesis of a flat-cylindrical type die-cutting machine with an optimized layout scheme]. *Polihrafiia i vydavnycha sprava – Printing and publishing*, 1(87), 165-173.
7. Song, R., Chu, J. Z., Wu, B. Z. (2011). Semi-Automatic Platen Die-Cutting Mechanism's Optimization Design Based on CAE Technology. *Advanced Materials Research*, 338, 223-226.
8. Topolnytskyi, P.V., Shustykevych, A.I., Kolomiets, A.B., Vatuliak, Yu.V. (2024). Doslidzhennia parametriv pryvoda natysknoho tsylindra shtantsiuvalnoi mashyny ploskotsylindrovoho typu [Research of the drive parameters of the pressing cylinder in a flat-cylindrical type die-cutting machine]. *Naukovi zapysky – Scientific notes*, 2(69), 140-150.
9. Rehei, I.I., Knysh, R.O., Ternovyi, A.M. (2023). Heometrychnyi syntez ta doslidzhennia kinematychnykh parametriv shtantsiuvalnoho presa z natysknym sehmentom [Geometric synthesis and research of the kinematic parameters of a die-cutting press with a pressure segment]. *Polihrafiia i vydavnycha sprava – Printing and publishing*, 2(86), 163-173.
10. Dombrovskyi, V.A., et al. (2003). *Vyscha matematika: pidruchnyk [Higher Mathematics: A Textbook]*. M.I. Shynkaryk (Ed.). Vydavnytstvo Karpiuka.
11. Berezin, L.M., et al. (2021). *Teoretychna mekhanika. Chastyna 1. Statyka, kinematyka: navch. posib. [Theoretical Mechanics. Part 1. Statics, Kinematics: Study Guide]*. Universytet "Ukraina".

Отримано 13.02.2025

Ivan Rehei¹, Oleh Knysh², Rostyslav Knysh³, Andrii Ternovyi⁴, Ihor Romanchuk⁵

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: Ivan.I.Rehei@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3395-2994>

Scopus Author ID: 57209409155

²Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: Oleh.B.Knysh@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5854-1879>

Scopus Author ID: 57209411556

³Graduate student of the department of computerized complexes of printing and packaging industries
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: Rostyslav.O.Knysh@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4005-5502>

⁴Graduate Student of the Department of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: Andrii.M.Ternovyi@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8933-6115>

⁵Assistant Professor of the Department of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: Ihor.O.Romanchuk@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8598-1054>

ANALYTICAL ASSESSMENT OF THE LINEAR DISPLACEMENT OF THE CENTER OF MASS OF THE PRESSURE SEGMENT DURING THE DIE-CUTTING PROCESS OF CARDBOARD PACKAGING BLANKS

The production of cardboard packaging blanks involves a set of operations, one of which is die-cutting. For this purpose, presses with a flat die-cutting method are used. A disadvantage of this method is the significant technological loads, which can reach several hundred tons. The article presents an analysis of publications dedicated to improving die-cutting presses and reducing technological loads. It has been established that the reduction of loads can be achieved by decreasing the contact area in the press pair. However, the existing studies only concern the retrofit of offset printing machines for die-cutting purposes. In this case, a small-diameter cylinder is used to create pressure. This leads to technological problems and poor-quality, inaccurate die-cutting.

The authors' research on the use of a large-radius segment to create process pressure in a die-cutting press was further developed in the article. The scheme of a crank-gear mechanism for driving the carriage with a pressing segment is considered. The displacement of the center of mass of the segment is studied for the optimised relative geometric sizes of the mechanism from previous works. For the accepted relative values of the radius and width of the segment, a condition is determined when it passes half of the path during die-cutting. The asymmetry of the oscillation angle of the segment relative to its horizontal position is substantiated. The nature of the change in the relative horizontal and vertical components of the displacement of the center of mass of the segment is investigated. Quantitative indicators of the change in the center of mass displacement are determined. Based on the results of the analytical research, the use of a large radius segment is justified in order to minimise the maximum values of the components of its center of gravity displacement.

The research on the linear displacement of the center of mass of the pressing segment creates the conditions for developing an additional means to reduce the impact of the bending moment on the carriage from the segment's weight in extreme positions.

Keywords: cardboard packaging; die-cutting press; segment; center of mass; mechanism; crank; support plate; relative displacement.

Fig.: 3. References: 11.

Євгеній Юрійович Сахно

доктор технічних наук, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет «Чернігівська політехніка» (м. Чернігів, Україна).

E-mail: evsakhno@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>. SCOPUS ID: 57190493489

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ МОДЕРНІЗОВАНОГО ГІДРОСТАТИЧНОГО ПІДШИПНИКА З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕОРІЇ ГРАФІВ

У науковій статті наведені дослідження процесів моделювання роботи модернізованого гідростатичного підшипника з використанням елементів теорії графів. Показано, що вдосконалення полягає в тому, що в запропонованому регуляторі корпус оснащений електромагнітним датчиком, який працює в парі з кільцем із феромагнітними вставками, яке закріплено на валу гідростатичного підшипника. Також наведено теоретичні дослідження структурного моделювання технічної системи при проектуванні та аналізі її роботи з використанням матриць інцидентності.

Рис.: 4. Табл.: 4. Бібл.: 6.

Актуальність теми. Розглядаючи тему модернізації гідростатичних підшипників (ГСП), постає питання швидкого, цілеспрямованого силового впливу на зміну навантаження в гідростатичних опорах технологічного обладнання для компенсації навантажень, що відбуваються в процесі роботи устаткування. З'ясовано, що компенсація навантажень відбувається за рахунок подачі в опору додаткового об'єму робочої рідини безпосередньо в точці найбільшого контакту вала з перемичкою підшипника швидко й короткочасно, і після зменшення навантаження рух рідини припиняється. Для проведення подальших досліджень та визначення ймовірності стабільної та безвідмовної роботи технологічної системи рекомендовано використовувати теорію графів, що є досить коректним методом аналізу при структурному моделюванні, оскільки досить часто завдання комп'ютерного програмування можна подати у вигляді математичної моделі та вирішити поставлені завдання досить простими дослідницькими методами та прийомами. Крім цього, у процесі роботи не обов'язково використовувати графічні зображення об'єкта досліджень, достатньо відомих наукових підходів та імітаційного моделювання, що дає можливість отримувати заданий результат та підвищити ефективність проектних рішень.

Постановка проблеми. Враховуючи, що множину об'єктів можна використовувати для абстрагування практично будь-якого типу технічних даних, теорія графів (ТГ) дає можливість глибокого дослідження взаємозв'язку між заданими технічними параметрами гідростатичного підшипника, що дає адекватні відповіді на питань розташування, налаштування гідросистеми, оптимізації та узгодження режимів її функціонування. Крім того, у такій постановці завдання проектування структури технологічної системи та її використання дає можливість застосовувати апарати штучного інтелекту, що зменшує час і спрощує побудову математичної моделі роботи гідромережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Так, у роботах [1; 2] показано, що вирішення прикладних задач у сфері інформаційних технологій потребує адаптації інформації та її спирання на математичну основу, а знання способів побудови логічних математичних конструкцій на базі теорії графів необхідно для ефективного аналізу інформації та створення нових програмних комплексів. Також проаналізовано сучасні науково-методичні роботи з теорії графів на тему практичного застосування ТГ у різних галузях людського життя, виявлено основні напрями використання ТГ під час розв'язування типових задач логістики, оптимізації, програмування, хімії та біології. У монографії [3] показано, що гідростатичні підшипники разом з підвищенням надійності і продуктивності обробки дозволяють забезпечити виключно високі показники якості деталей у порівнянні з іншими типами шпиндельних опор. Робота [4] містить теоретичні матеріали, методики

структурного моделювання технічних систем та розрахунку параметрів їхньої надійності, які необхідні при проектуванні системних моделей. У роботі [5] показано, що класичним способом представлення графа є матриця інциденції, у якій вказуються зв'язки між інцидентними елементами графа (ребро і вершина). Стовпці матриці відповідають ребрам, рядки – вершинам, а ненульове значення в клітинці матриці вказує на зв'язок між вершиною і ребром, тобто їх інцидентність.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Таким чином, теорія графів може бути використана для моделювання парних взаємозв'язків між елементами заданої множини модернізованого ГСП. Використовуючи відповідні інформаційні підходи можливо отримати візуальну ілюстрацію заданих технічних параметрів та визначити ступінь відношень між ними. Використання запропонованого методу дозволяє представити надто численні або складні дані, для їх адекватного опису в системній моделі, з подальшою розробкою алгоритму та керуючою програмою управління роботи гідровузла. Забезпечення чіткості та коректності опису даних у графах також формує ефективність використання запропонованої теорії при моделюванні процесів та систем гідроавтоматики.

Мета статті. Метою цієї роботи є розроблення теоретичних підходів та практичних рекомендацій щодо проектування нової системи живлення гідростатичних опор з використанням теорії графів, що дає можливість з'ясувати зв'язки між параметрами технічної системи, що дозволяє розробляти технічні рішення для стабілізації положення вала при його зміщенні під навантаженням.

Результати досліджень. Загальновідомо, що наочно граф можна представити як геометричну конфігурацію, що складається з точок (вершин) і ребер (ліній або відрізків, які сполучають деякі точки) [1,2]. Нехай $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ деяка скінченна множина вершин, тоді M_2 – множина всіх невпорядкованих пар елементів з X ,

$$M_2 = \{(x_i, x_j) : x_i \in X, x_j \in X, i \neq j\}.$$

У результаті маємо граф $G(X, W)$ з парою множин $X, W \in M_2$, де множина X – це множина вершин, а W відповідно множина ребер. Якщо $(x_i, x_j) \in W$, то можна казати, що ребро (x_i, x_j) сполучає вершину x_i з вершиною x_j , тобто вони інцидентні.

Для моделювання гідростатичного підшипника з використанням теорії графів розглянемо основні елементи модернізованої гідромережі. В основу запропонованого винаходу поставлено задачу вдосконалити ГСП (див. патент України № 77639) шляхом усунення металевих контактів між спряженими поверхнями. Удосконалення полягає в тому, що в запропонованому регуляторі корпус оснащений електромагнітним датчиком, який працює в парі з кільцем, закріпленим на валу гідроопори. В останнє вмонтовано феромагнітні вставки і при переміщенні шийки вала під дією зовнішнього навантаження відбувається їх взаємодія, у результаті цього виникає електричний імпульсний сигнал, який подається до підсилювача імпульсу, а той, у свою чергу, передає його до електрогидравлічного клапана, через який додатковий об'єм робочої рідини подається до ГСП від окремeho насоса й за допомогою якого здійснюється компенсація витрат рідини в гідростатичному підшипнику [3; 6].

Запропонована конструкція складається з корпусу 10 (рис. 1), на якому закріплено датчик електромагнітного імпульсу ДІ, який має гвинт для регулювання зазору 8, підсилювач електричного імпульсу ПІ, електрогидравлічного клапана КІЗ, автономного джерела живлення системи Н2 та додаткового каналу 9. Контроль переміщень кривошипу під час перевантажень здійснюється за допомогою кільця 6 з феромагнітними вставками 5, що закріплене на корінній шийці кривошипу 4 гвинтами 7, встановленими під кутом 120°, і є проміжною ланкою між корінною шийкою 4 кривошипу 2 і датчиком електрич-

ного імпульсу ДІ. Після встановлення в кільце чотирьох феромагнітних вставок 5 (у прорізи через 90°), зовнішня поверхня кільця оброблена шліфуванням. У момент збільшення навантаження фізична вісь обертання вала 2 зміщується відносно геометричної осі. Під час запуску двигуна кривошип 2 завдяки роботі шатуна 1 починає обертатися, при цьому осьовий зазор δ_2 зменшується, і феромагнітна вставка 5 наближається до датчика ДІ, викликаючи підсилення збудження в котушці, унаслідок чого виникає стрибок напруги (імпульс). Далі сигнал потрапляє до підсилювача імпульсів ПІ, і подається до електрогідравлічного клапана КПЗ, який відкриває прохід рідині змащування від додаткової системи з тиском p_2 від насоса Н2 до гідростатичної опори 12, доповнюючи систему живлення від насосу Н1 через канал 3 з тиском p_1 . Величина компенсації тисків залежить від величини відкриття вікна каналу підводу рідини, яка своєю чергою залежить від величини переміщення кривошипу під навантаженням зі зменшенням робочого зазору δ_1 [6].

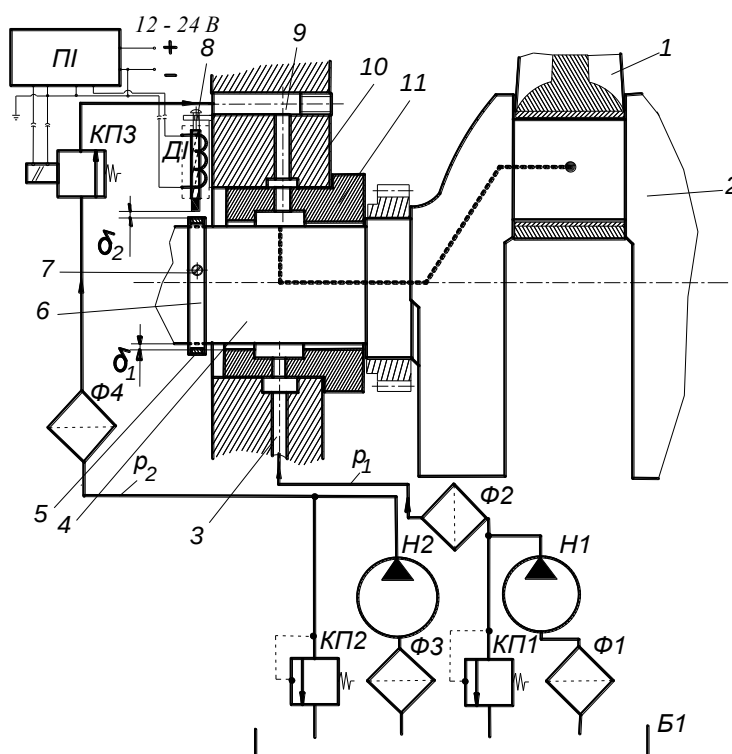


Рис. 1. Схема живлення модернізованого гідростатичного підшипника

Для побудови графа гідромережі введемо такі умовні позначення табл. 1.

Табл. 1 – Умовні позначення для створення графа гідромережі

N, пп	Найменування	Умовні позначення	Вершини графа
1	Бак	Б1	X ₁
2	Основний насос гідромережі	Н1	X ₂
3	Карман гідроопори	КО1	X ₃
4	Вал підшипника з кільцем	В1	X ₄
5	Датчик коливань	Д1	X ₅
6	Підсилювач сигналу	П1	X ₆
7	Додатковий насос гідромережі	Н2	X ₇
8	Клапан запобіжний	КЗ1	X ₈
9	Додаткові отвори ГСП	ДО1	X ₉
10	Виконавчий механізм	ВМ1	X ₁₀

Таким чином на основі табл. 1 будемо мати мультиграф або просто (орієнтований) граф G , який описується парою об'єктів $G = (X, \Gamma)$, де X – множина, а Γ – скінченна підмножина прямого добутку $X \times X \times Z$, де Z – множина невід'ємних цілих чисел. При цьому X називається множиною вершин, а Γ – множиною дуг графа G (рис. 2).

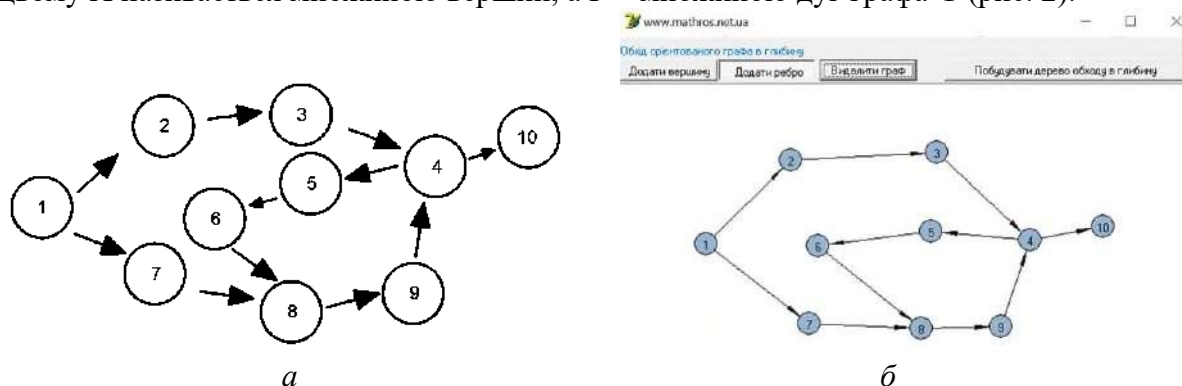


Рис. 2. Побудова графа гідромережі:

а – граф структури технічної системи;

б – граф у програмному комплексі із сайту Mathros.net.ua

Покажемо, як уведене визначення формалізує поняття графа гідромережі, що описана вище. Дугу (стрілку), що з'єднує вершини x_i , x_j , позначимо через (x_i, x_j, n) , де x_i , початок дуги, x_j – її кінець, а n – номер дуги. Таким чином, граф який зображено на рис. 2 може бути описаний такими аналітичними рівняннями:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}.$$

$$\Gamma = \{(x_1, x_2, 1), (x_2, x_3, 1), (x_3, x_4, 1), (x_4, x_{10}, 1), (x_4, x_5, 1), (x_5, x_6, 1), (x_6, x_7, 1), (x_1, x_7, 1), (x_7, x_8, 1), (x_8, x_9, 1), (x_9, x_4, 1)\}.$$

Проведемо аналіз структури технічної системи та зробимо розрахунок параметрів їхньої надійності [4]. Оберемо такі вихідні дані для розрахунку: граф заданої структури (рис. 2); ланцюг елементарної структури, що забезпечує надійність функціонування системи автоматизованого керування гідромережі і яку потрібно оцінити – 4, 5, 6, 8, 9; номери, які резервуються – 5, 8; ймовірність безвідмовності роботи ланок $p_4 = 0,98$, $p_5 = 0,85$, $p_6 = 0,88$, $p_8 = 0,91$, $p_9 = 0,98$; ймовірності резервованих ланок $p_{5R} = 0,89$, $p_{8R} = 0,93$; параметри розподілу випадкової величини (часу виконання операцій технічною системою): $\lambda = 0,18 \text{ год}^{-1}$, $t_0 = 3,0 \text{ год}$, $\sigma = 0,4 \text{ год}$.

Далі проведемо аналіз елементів заданого графа. Загальновідомо, що в орієнтованому графі ступенем виходу вершини v називають загальну кількість дуг, що закінчуються у вершині v , і її позначають $outdeg_v$. Ступенем входу вершини v називають кількість дуг, які починаються у вершині v , і її позначають $indeg_v$. Якщо $indeg_v = 0$, то вершину v називають джерелом, якщо $outdeg_v = 0$, то вершину v називають стоком. Висяча вершина може мати ступень виходу, яка дорівнює 1 та ступень входу, яка дорівнює 0 та навпаки [1; 2]. У табл. 2 представлено визначення ступеня вершин орієнтованого графа.

Табл. 2 – Ступені вершин графа

Вершини	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$indeg_v$	0	1	1	4	1	1	1	2	1	1
$outdeg_v$	2	1	1	2	1	1	1	1	1	0

Таким чином встановлено, що система має один вхід (вершина 1) і один вихід (вершина 10). Структура системи побудована коректно, оскільки не містить ізольованих вершин.

Визначаємо міру надлишкових зв'язків для цього графа побудувавши матрицю суміжності:

$$V = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

За відомими залежностями, використовуючи матрицю суміжності, визначаємо суму зв'язків у її рядках:

$$R = 2 + 1 + 1 + 2 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 0 = 12.$$

Тоді, враховуючи, що кількість вершин $n = 10$, міра надлишку зв'язків визначаються:

$$\alpha = \frac{R}{n-1} - 1 = \frac{12}{10-1} - 1 = 0,333.$$

У структурі ТС, яка аналізується, присутній надлишок зв'язків.

Для визначення діаметра структури знаходимо мінімальні шляхи між вершиною 1 і тупиковою 10. З аналізу графа очевидно, що $d_{\min 1-10} = 4$ ребра (шлях 1-2-3-4-10). Тоді діаметр структури визначаємо:

$$d = \max(d_{\min ij}) = \max(4) = 4.$$

Тут діаметр структури дорівнює найкоротшому шляху між одним входом і одним виходом із системи і становить 4 ребра.

Далі визначимо показник складності структури ТС. Проведемо аналіз її елементів і підрахуємо загальну кількість шляхів, які ведуть з однієї вершини 1 у одну тупикову 10: $\rho_{1-10} = 2$ (шляхи 1-2-3-4-10, 1-7-8-9-4-10). Підсумовуючи всі переховані шляхи та підставляючи їх у формулу, отримуємо:

$$\rho = \frac{1}{m_1 m_2} \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_2} \rho_{ij} - 1 = \frac{1}{1 \cdot 1} (2) - 1 = 1.$$

З результатів видно, що структура складна, оскільки структура з мінімальною складністю повинна мати показник $\rho = 0$.

Якщо розглянути основні показники надійності, то можна помітити, що всі вони за своїм характером є випадковими величинами. З цієї причини основним математичним апаратом, який застосовується для побудови математичних моделей надійності ТС та розрахунку її параметрів, є теорія ймовірностей і математична статистика. Оскільки ймовірність безвідмовної роботи ТС є найголовнішим показником надійності в усіх подальших прикладах, будемо розраховувати саме її значення [4]. Надійність роботи такий ТС можна розрахувати за залежністю:

$$P = p_1 p_2 p_3 \dots p_n = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (1)$$

де P – надійність системи; $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ – надійність окремих її елементів; n – кількість елементів системи.

Нерезервована ТС являє собою послідовне (за аналогією з провідниками в електротехніці) з'єднання n елементів, жоден з яких не має резерву, і у відмови одного елемента означає вихід з ладу всієї ТС. Якщо надійності окремих елементів системи рівні, тобто: $p_1 = p_2 = p_3 = \dots = p_n$, то залежність (1) можна переписати у вигляді:

$$P = p^n \text{ чи } p = \sqrt[n]{P}. \quad (2)$$

Отже, при послідовному з'єднанні нерезервованих елементів, надійність ТС дорівнює добутку надійностей усіх елементів системи. Накреслимо структурні схему, яка містить визначені елементи (рис. 3, а).

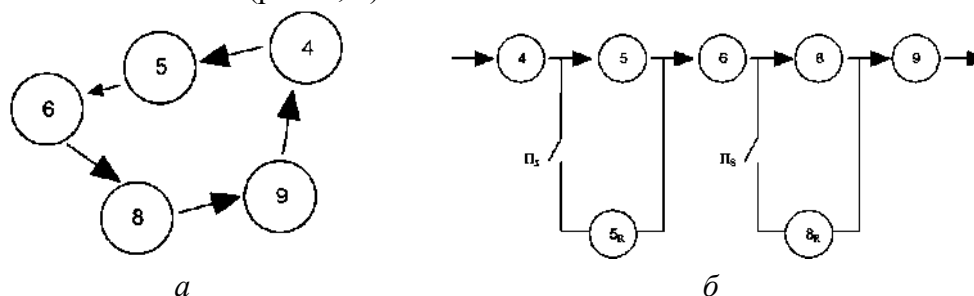


Рис. 3. а – елементарна структура до розрахунку параметрів надійності; б – схема резервування елементу ТС: 4, 5, 6, 8, 9 – основні елементи системи; 5_Р, 8_Р – резервні елементи системи; П₅, П₈ – перемикачі, які автоматично включаються в ланцюг резервні елементи у разі відмови основних

Для підвищення надійності ТС, в їх склад вводять резервні елементи для заміни основних елементів, які відмовили. Схема резервування ТС показана на рис. 3, б. Розрахуємо надійність елемента n з урахуванням його резерву – елемента n_p . Спочатку розрахуємо надійність резерву, який є ділянкою з послідовним з'єднанням резервного елемента n_p і перемикача Π_n . Згідно з (1), надійність такої ділянки визначиться:

$$p_p = p_{I_p} p_{\Pi_n} \quad (3)$$

Якщо продовжити аналогію з електротехнікою, таку систему можна розглядати як електричний ланцюг зі змішаним (паралельно-послідовним) з'єднанням елементів. В роботі [4] отримано залежність для розрахунку надійності такої системи:

$$P = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - p_i)(1 - p_{i_p} p_{\Pi_i})], \quad (4)$$

де p_p – надійність резерву; $p_{n_p} p_{\Pi_n}$ – надійності, відповідно, резервного елемента n і перемикача Π_n .

Таким чином, використовуючи наведені вище залежності, можна розрахувати ймовірність безвідмовної роботи ТС, якщо відомі ймовірності безвідмовної роботи всіх її елементів. Вказані ймовірності визначаються шляхом експериментальних досліджень з подальшою обробкою експериментальних даних за допомогою методів математичної статистики. Залежно від закону розподілу, яке застосовується при математичній обробці експериментів, отримують формули для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи ТС або її елемента [4]. Рішення цієї задачі виконуємо у два етапи.

Етап 1. Визначення еквівалентних можливостей для елементів 5 і 8:

$$p_{5e} = 1 - (1 - p_5)(1 - p_{5R} p_{\Pi 5}) = 1 - (1 - 0,85)(1 - 0,89 \cdot 0,97) = 0,9795;$$

$$p_{8e} = 1 - (1 - p_8)(1 - p_{8R} p_{\Pi 8}) = 1 - (1 - 0,91)(1 - 0,93 \cdot 0,97) = 0,9912.$$

Етап 2. Знаходження загальної ймовірності безвідмовної роботи ТС

$$p = p_4 p_{5e} p_6 p_{8e} p_9 = 0,98 \cdot 0,9795 \cdot 0,88 \cdot 0,9912 \cdot 0,98 = 0,82054.$$

Проведемо розрахунок ймовірності безвідмовної роботи ТС при виконанні нею задання випадкової тривалості. Для прикладу візьмемо технічна система – верстат з ЧПК для обробки заготовок складної просторової форми, функціонування якого характеризується потоком збоїв з інтенсивністю $\lambda = 0,18 \text{ год}^{-1}$. Тривалість обробки заготовок є випадковою величиною, розподіленою за нормальним законом із середнім часом $t_0 = 3,0 \text{ год}$ і середнім квадратичним відхиленням $\sigma = 0,4 \text{ год}$. Ймовірності того, що під обробки довільної обробки заготовки не буде збою у роботі верстата така [4]:

нормальне значення: $W(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}}$; точне вираження: $W(t) = e^{-0,18 \cdot 3 + \frac{0,4^2 - 0,18^2}{2}} = 0,58$;

приблизне вираження: $W(t) = 1 - 0,18 \cdot 3 + \frac{0,18^2(3^2 + 0,4^2)}{2} = 0,6$.

На сьогодні важливим завданням системного моделювання складних організаційно-технічних об'єктів є виявлення взаємозв'язків між елементами, що зводиться до їх кількісного опису. Тому згідно з поставленою метою проведемо дослідження взаємозв'язків гідромережі з використанням матриці суміжності [5]. Матрицею суміжності мультиграфа $G = (X, \Gamma)$ будемо називати матрицю розміру $n \times n$, де $n = |X|$, у якій елемент a_{ij} , дорівнює числу елементів Γ , що мають вигляд (x_i, x_j, m) . У графі без кратних дуг елементи a_{ij} , можуть дорівнювати одиниці або нулю залежно від того, чи входить дуга в (x_i, x_j) у Γ чи ні. Для побудови матриці інцидентності всієї гідромережі проведемо ініціалізацію ТС та визначимо вхідні та вихідні параметри гідровузла (табл. 3).

Таблиця 3 – Параметри ініціалізації технічної системи

Вхідні параметри $x(t)$		Вихідні параметри $y(t)$	
$x_1(t)$	Осьове та радіальне навантаження	$y_1(t)$	Несуча здатність(жорсткість)
$x_2(t)$	Частота обертання валу	$y_2(t)$	Амплітудно-частотні характеристики
$x_3(t)$	Тип тертя в опорі	$y_3(t)$	Рівень коливань ротора
$x_4(t)$	В'язкість робочої рідини	$y_4(t)$	Термін служби роторного вузла
$x_5(t)$	Геометричні параметри роторного вузла	$y_5(t)$	Енерговитрати та експлуатаційні витрати
$x_6(t)$	Статична та динамічна невідновженість ротора	$y_6(t)$	Зміщення вала
$x_7(t)$	Тиск та витрати робочої рідини	$y_7(t)$	Робочий зазор в підшипнику
		$y_8(t)$	Температура підшипника

Розглянемо відношення $R_{(T)}$ між x і y як бінарні, які відображають необхідні параметри множини X_i для визначення відповідних елементів множини Y_i , тоді $R_{(I)} \subset X \times Y$ є відношення процесу ініціалізації. Кінцеве відношення представляється за допомогою фактор-множини або за допомогою матриці (табл. 4.).

Табл. 4 – Матриця інцидентій

$x \backslash y$	$y_1(t)$	$y_2(t)$	$y_3(t)$	$y_4(t)$	$y_5(t)$	$y_6(t)$	$y_7(t)$	$y_8(t)$
$x_1(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1
$x_2(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1
$x_3(t)$	1	1	1	1	1	0	0	1
$x_4(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1
$x_5(t)$	1	1	1	0	1	1	1	1
$x_6(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1
$x_7(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1

Матричне представлення відносин ґрунтується на тому, що стовпці відповідають першим параметрам, а рядки другим параметрам. На перетині i -того стовпця та j -того рядка ставимо одиницю, якщо виконано відношення між x_i та y_j , і нуль, якщо це відношення не виконується.

Бінарне рівняння буде:

$R_T = f\{(x_1, y_1); (x_1, y_2); (x_1, y_3); (x_1, y_4); (x_1, y_5); (x_1, y_6); (x_1, y_7); (x_1, y_8); (x_2, y_1); (x_2, y_2); (x_2, y_3); (x_2, y_4); (x_2, y_5); (x_2, y_6); (x_2, y_7); (x_2, y_8); (x_3, y_1); (x_3, y_2); (x_3, y_3); (x_3, y_4); (x_3, y_5); (x_3, y_8); (x_4, y_1); (x_4, y_2); (x_4, y_3); (x_4, y_4); (x_4, y_5); (x_4, y_6); (x_4, y_7); (x_4, y_8); (x_5, y_1); (x_5, y_2); (x_5, y_3); (x_5, y_5); (x_5, y_6); (x_5, y_7); (x_5, y_8); (x_6, y_1); (x_6, y_2); (x_6, y_3); (x_6, y_4); (x_6, y_5); (x_6, y_6); (x_6, y_7); (x_6, y_8); (x_7, y_1); (x_7, y_2); (x_7, y_3); (x_7, y_4); (x_7, y_5); (x_7, y_6); (x_7, y_7); (x_7, y_8)\}$.

Цю матрицю інцидентій можна використовувати при розробці програм для інформаційної системи та нейромережевого моделювання гідромережі. Композиція відносин $R_{(T)} \subset X \times Y$ представляється за допомогою графу (рис. 4).

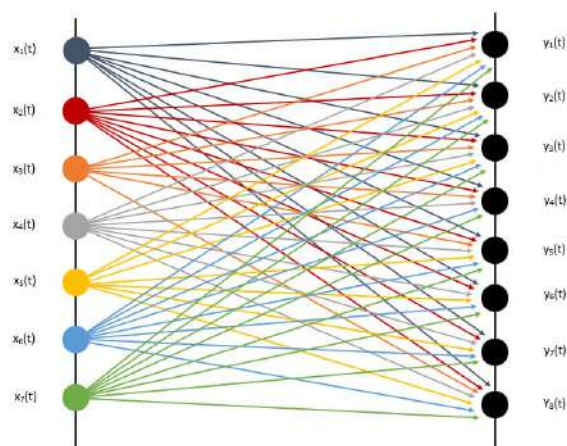


Рис. 4. Граф впливів параметрів гідромережі

З аналізу роботи ТС та графу впливів зрозуміло, що всі входні та вихідні параметри гідромережі пов'язані між собою, а мова може йти лише про ступінь зв'язку між елементами. Ці зв'язки тією чи іншою мірою представлено в науково-технічній літературі, деякі досить ретельно, деякі потребують подальших досліджень. Проте рішення поставленої задачі у вигляді графа дає можливість зрозуміти відносини між елементами гідромережі, що дає можливість проводити подальше моделювання (регресійний, кореляційний аналіз) та керувати параметрами гідросистеми при зміні силового навантаження на вал ГСП.

Висновки. На основі вищезазначеного можна стверджувати, що розробка теоретичних підходів аналізу модернізованого гідростатичного підшипника на основі теорії графів, що адекватно відображають технологічні процеси в ТС, є важливим та актуальним завданням наукового дослідження роботи щодо протікання робочих процесів під час роботи гідромережі. Також на основі вищезазначеного можна стверджувати, що розробка математичних моделей рідинного впливу на вал гідростатичного підшипника, що досить коректно відображають технологічні процеси з використанням сучасної теорії графів, є важливим та актуальним завданням, вирішення якого дозволить отримати нові знання щодо функціонування елементів технологічної системи з можливістю керування технічними параметрами її елементів.

Список використаних джерел

1. Кузьменко, І. М. (2020). *Теорія графів: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерний моніторинг та геометричне моделювання процесів і систем» спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»*. КПІ ім. Ігоря Сікорського.
2. Бобрицька, Г.С. (2017). Прикладне застосування теорії графів у різних сферах життя суспільства та окремої особистості. *Фізико-математична освіта*, 3, 26-30.
3. Федориненко, Д. Ю., Сапон, С. П. (2016). *Шпindelні гідростатичні підшипники: монографія*. ЧНТУ.
4. Федорович С. А., Литовченко П. І. (Уклад.). (2004). *Методичні вказівки та завдання до контрольних робіт з курсу «Теорія технічних систем» для студентів спеціальності 7.090202 «Технологія машинобудування» денної та заочної форм навчання*. НТУ "ХПІ".
5. DMOJ: Modern Online Judge. (б.д.). Матриця інцидентності – DMOJ: Modern Online Judge. <https://dmoj.uzhnu.edu.ua/problem/122>.
6. Сахно, Є. Ю. (2022). Визначення основних параметрів модернізованого гідростатичного підшипника з урахуванням зміщення вала під навантаженням. *Технічні науки та технології*, 1(27), 7-15.

References

1. Kuzmenko, I.M. (2020). *Teoriia hrafiv: navch. posib. dlia zdobuvachiv stupenia bakalavra za osvituioi prohramoiu «Kompiuterni monitorynh ta heometrychne modeliuvannia protsesiv i system» spetsialnosti 122 «Kompiuterni nauky»* [Graph theory: teaching. manual for bachelor's degree holders in the educational program "Computer monitoring and geometric modeling of processes and systems" specialty 122 "Computer science"]. KPI named after Igor Sikorskyi.
2. Bobrytska, G.S. (2017). *Prykladne zastosuvannia teorii hrafiv u riznykh sferakh zhyttia suspilstva ta okremoï osobystosti* [Applied application of graph theory in various spheres of society and individual life]. *Fizyko-matematychna osvita – Physical and mathematical education*, 13, 26-30.
3. Fedorovych, S.A., Litovchenko, P.I. (2004). *Metodychni vkazivky ta zavdannia do kontrolnykh robot z kursu «Teoriia tekhnichnykh system» dlia studentiv spetsialnosti 7.090202 «Tekhnolohiia mashynobuduvannia» dennoi ta zaochnoi form navchannia* [Methodological instructions and tasks for control papers from the course "Theory of technical systems" for students of the specialty 7.090202 "Technology of mechanical engineering" of full-time and correspondence forms of study]. NTU "KhPI".
4. Fedorinenko, D.Y., Sapon, S.P. (2015). *Shpyndelni hidrostatychni pidshypnyky* [Spindle hydrostatic bearings]. Chernihiv. Nats. Technol. Un-t.
5. DMOJ: Modern Online Judge. (n.d.). Matrytsia intsydentnosti [Incidence matrix]. <https://dmoj.uzhnu.edu.ua/problem/122>.
6. Sakhno, E.Y. (2022). *Vyznachennia osnovnykh parametriv modernizovanoho hidrostatychnoho pidshypnyka z urakhuvanniam zmishchennia vala pid navantazhenniam* [Determination of the main parameters of the modernized hydrostatic bearing taking into account the displacement of the shaft under load]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 1(27), 7-15.

Отримано 20.01.2025

UDC 621.92

Yevgeniy Sakhno

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management,
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: evsakhno@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>. SCOPUS ID: 57190493489

MODELING OF WORKING PROCESSES OF A MODERNIZED HYDROSTATIC BEARING USING ELEMENTS OF GRAPH THEORY

Continuing the topic of modernization of hydrostatic bearings, the issue of rapid, targeted force influence on the change in load in hydrostatic supports of technological equipment to compensate for loads occurring during the operation of the product becomes relevant.

For further research and determination of the probability of stable and uninterrupted operation of the technological system, it is recommended to use graph theory, which is a fairly correct method of analysis in structural modeling, since quite often computer programming tasks can be presented in the form of a video platform and the tasks set can be solved using straightforward research methods and techniques.

The purpose of this work is to formulate theoretical frameworks and practical guidelines for the design of a novel hydrostatic support power supply system utilising graph theory. This approach enables the elucidation of the relationships between the parameters of the technical system, thereby facilitating the development of technical solutions for the stabilisation of the shaft's position during displacement under load.

Given that a set of objects can be used to abstract almost any type of technical data, graph theory allows for in-depth study of the relationship between the given technical parameters of a hydrostatic bearing, which provides adequate answers to the questions of location, hydraulic system configuration, optimization and coordination of operating modes. In addition, in this formulation of the task of designing the structure of a technological system and its use, it is possible to use artificial intelligence devices, which reduces time and simplifies the construction of a mathematical model of the hydraulic system.

Keywords: graph, hydrostatic bearing, incident matrix.

Fig.: 4. Table: 4. References: 6.

Олексій Сергійович Васильєв¹, Андрій Михайлович Яковенко²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)

E-mail: a.s.vasiliev.76@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9914-5482>

²викладач

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)

E-mail: andrii.yakovenko95@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0818-6332>

ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ВП-10

Вібраційні плити є важливим елементом засобів малої механізації та широко застосовуються для пошарового ущільнення різноманітних матеріалів, зокрема піску, гравію, бітумних сумішей та інших будівельних компонентів. Вібраційне ущільнення відіграє ключову роль у технологічних процесах будівництва дорожніх покриттів, фундаментів та інших інженерних споруд, забезпечуючи необхідні фізико-механічні властивості матеріалів.

У цій роботі було визначено кінетичну енергію вібраційної плити ВП-10, розробленої для ущільнення ґрунтів і будівельних матеріалів в умовах обмеженого простору. В ході досліджень застосовано фізико-математичного моделювання на основі методів прикладної механіки. Визначення загальної кінетичної енергії, що є сумою кінетичних енергій окремих складових системи (плити, корпусу вібраційної плити, корпусу віброзбуджувача та дебалансу) була побудована кінематична схема досліджуваного обладнання. Отримана функціональна залежність кінетичної енергії є необхідною передумовою для подальшого математичного моделювання системи із застосуванням рівнянь Лагранжа другого роду. Виконаний аналіз дозволяє розширити уявлення про динаміку роботи вібраційної плити та сприяє вдосконаленню її конструктивних і технологічних параметрів.

Ключові слова: вібраційна плита; момент інерції; вібраційна машина; кінетична енергія; віброзбуджувач; дебаланс.

Рис.: 3. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Вібраційне ущільнення є найбільш ефективним і поширеним методом ущільнення матеріалів [1; 2]. Аналіз динамічних характеристик вібраційного обладнання та багаторічні теоретичні й експериментальні дослідження дозволили виявити низку специфічних ефектів, що виникають під час взаємодії механічних систем із вібраційним збудженням. Вібраційні машини відзначаються високою ефективністю ущільнення, конструктивною простотою, надійністю та порівняно низькою матеріало- й енергоємністю. У сучасному машинобудуванні одним із ключових завдань є підвищення енергоефективності вібраційної техніки без втрати її продуктивності, що є особливо актуальним для будівельного сектору.

Постановка проблеми. У межах цього дослідження розглядається вібраційна плита ВП-10, призначена для ущільнення ґрунтів та будівельних матеріалів у обмежених просторах. Для оцінки впливу її конструктивних параметрів на кінематику робочого органу та загальні енерговитрати необхідно визначити кінетичну енергію механічної системи та сформулювати її математичну модель. Це дозволить оптимізувати режими роботи установок, зменшити енергоспоживання та підвищити якість ущільнення матеріалів.

Аналіз останніх джерел досліджень. Кінетична енергія є одним із найважливіших параметрів, що визначають динамічні характеристики вібраційних машин, зокрема вібраційних плит, які використовуються для ущільнення ґрунтів і будівельних матеріалів. Дослідження останніх років свідчать про те, що правильне визначення кінетичної енергії дозволяє оптимізувати робочі режими вібраційних установок, підвищити ефективність їхньої роботи та мінімізувати енергетичні витрати [3].

Розвиток вібраційних технологій у поєднанні з широким спектром теоретичних і експериментальних досліджень динаміки вібраційних машин дозволив глибше зрозуміти принципи їхньої роботи та виявити ефекти, що виникають при дії вібрацій на механічні системи [4; 5]. Особливу увагу в сучасних дослідженнях [6] приділено визначенню ключових параметрів вібраційних плит, зокрема амплітуди та частоти коливань, кінетичної енергії, параме-

трів маси та силових характеристик віброзбуджувача, які безпосередньо впливають на ефективність ущільнення. Високий рівень ефективності вібраційних установок, їхня конструктивна простота, надійність та оптимальне співвідношення маси та енерговитрат роблять ці машини невід'ємним елементом сучасних технологічних процесів.

Визначення кінетичної енергії вібраційних систем часто використовується для оцінки впливу параметрів маси, частоти та амплітуди коливань на ефективність ущільнення матеріалів. У сучасних наукових працях розглядається питання вдосконалення робочих процесів обладнання через математичне моделювання, що дозволяє більш точно прогнозувати їхню поведінку та покращувати конструктивні рішення [5]. Однак більшість із цих досліджень орієнтовані на загальні моделі або інші типи вібраційного обладнання, що може обмежувати їхню застосовність для конкретних конструкцій, зокрема для ВП-10. Отримання оригінальної моделі дозволяє більш точно дослідити роботу вібраційної плити.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Дослідження вібраційних плит для ущільнення матеріалів у будівельній галузі є актуальним завданням, що охоплює аналіз їхньої динаміки та впливу на різні типи ущільнюваних середовищ. Оскільки кожна машина має унікальні конструктивні та динамічні характеристики, процес визначення її параметрів, зокрема кінетичної енергії, потребує індивідуального підходу. Дослідження динамічних параметрів вібраційної плити ВП-10 дає змогу глибше зрозуміти особливості її функціонування. Однією з ключових проблем є визначення кінетичної енергії системи, що дозволяє оцінити ефективність передавання енергії від віброзбуджувача до робочого органу та подальше формування оптимальних режимів експлуатації.

Мета статті. Визначення кінетичної енергії розробленої вібраційної плити ВП-10 для ущільнення ґрунтів і будівельних матеріалів в умовах обмеженого простору. Отримана функціональна залежність кінетичної енергії є необхідною передумовою для подальшого математичного моделювання системи із застосуванням рівнянь Лагранжа другого роду.

Виклад основного матеріалу. Для проведення комплексного аналізу динаміки роботи вібраційної машини [7] необхідно детально дослідити вплив основних параметрів її конструкції на рух робочого органу. Зокрема, слід визначити оптимальне співвідношення між масою окремих конструктивних елементів, величиною вимушуючої сили, що генерується віброзбуджувачем, та зовнішньою рушійною силою. Важливим аспектом у цьому контексті є визначення кінетичної енергії вібраційної плити, оскільки ця характеристика безпосередньо впливає на ефективність передавання енергії від віброзбуджувача до ущільнюваного матеріалу. Аналіз кінетичної енергії дозволяє оцінити енергетичні витрати процесу, визначити режими роботи, що забезпечують максимальну продуктивність, та мінімізувати непродуктивні витрати енергії, що, у свою чергу, сприяє підвищенню ефективності ущільнення.

Для визначення положення й опису рухів тіл розглядуваної механічної системи застосуємо три системи координат: нерухому Oyz і рухомі $Sy'z'$ та Sy_1z_1 . Початок відліку O нерухомої системи Oyz пов'яжемо з центром інерції C плити 4 у початковому положенні механічної системи, яке подано на рис. 1. Початок відліку обох рухомих систем координат рухається разом із точкою C ; при цьому система Sy_1z_1 рухається самостійно поступально, через що її осі лишаються паралельними осям нерухомої системи координат, а система $Sy'z'$ жорстко пов'язана з плитою 4. У початковому положенні механічної системи усі три системи координат збігаються, а при русі механічної системи точка C характеризує рух центра інерції плити в нерухомій системі Oyz .

Зобразимо на рис. 1 кінематичну схему досліджуваної механічної системи у її певному положенні в довільний момент часу t .

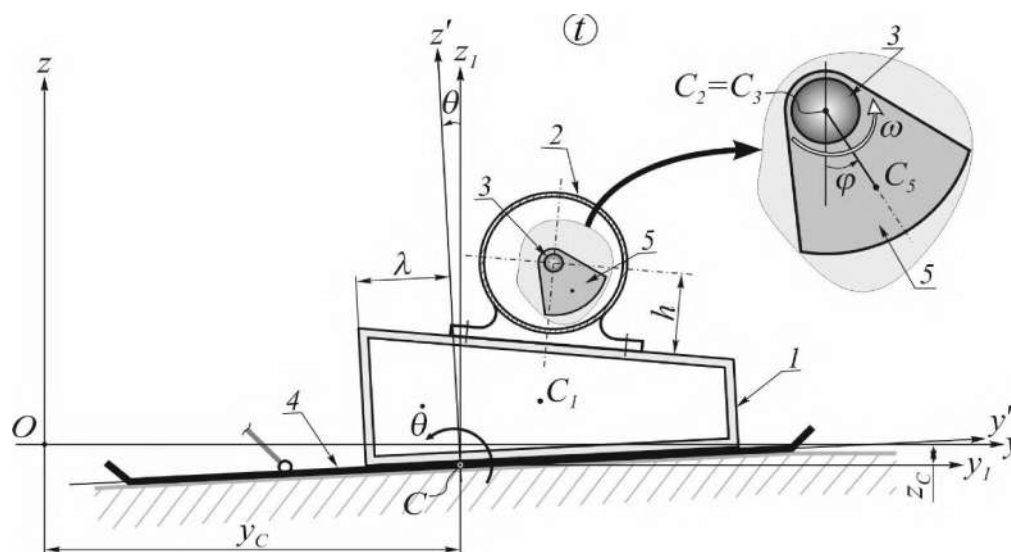


Рис. 1. Кінематична схема механічної системи

Оскільки механічна система, що моделює віброташину, складається з чотирьох матеріальних тіл, то кінетична енергія цієї механічної системи

$$T = T_1 + T_2 + T_4 + T_5, \quad (1)$$

де T_1 , T_2 , T_4 і T_5 – відповідно кінетичні енергії корпусу 1, корпусу віброзбуджувача 2, плити 4 і дебалансу 5.

Для знаходження T_4 оберемо за полюс точку C плити 4; враховуючи, що плита 4 здійснює плоскопаралельний рух, за теоремою Кеніга [8]

$$T_4 = \frac{m_4 \cdot V_C^2}{2} + \frac{I_{4C} \cdot \omega_4^2}{2}, \quad (2)$$

де V_C – модуль швидкості точки C ; $\omega_4 = \dot{\theta}$ – модуль миттєвої кутової швидкості плити 4 навколо осі Ω миттєвого обертання, яка в розглядуваному положенні механічної системи проходить через точку C перпендикулярно до площини розташування механічної системи; I_{4C} – осьовий момент інерції плити 4 (як однорідної абсолютно твердої прямокутної пластини розмірами $\ell_4 \times \delta_4$) відносно зазначеної осі миттєвого обертання, який згідно з [8] дорівнює:

$$I_{4C} = \frac{m_4 \cdot (\ell_4^2 + \delta_4^2)}{3}. \quad (3)$$

При координатному способі визначення руху точки [9] при русі точки в площині Oyz модуль

$$V_C = \sqrt{V_{Cy}^2 + V_{Cz}^2}, \quad (4)$$

де $V_{Cy} = \dot{y}_C$ і $V_{Cz} = \dot{z}_C$ – проєкції вектора $\vec{V}_C$ швидкості точки C на осі нерухомої системи відліку Oyz ; тоді

$$V_C^2 = \dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2. \quad (5)$$

Підставляючи наведені значення в формулу (2), дістанемо, що:

$$T_4 = \frac{m_4}{2} \cdot (\dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2) + \frac{I_{4C} \cdot \dot{\theta}^2}{2}. \quad (6)$$

Аналогічно до визначення T_4 , кінетична енергія корпусу 1

$$T_1 = \frac{m_1 \cdot V_{C_1}^2}{2} + \frac{I_1 \cdot \omega_1^2}{2}, \quad (7)$$

де v_{C_1} – модуль швидкості центра інерції C_1 корпусу 1; ω_1 – модуль миттєвої кутової швидкості корпусу 1 навколо осі його миттєвого обертання, яка в розглядуваному положенні механічної системи проходить через точку C_1 перпендикулярно до площини розташування механічної системи; I_1 – осьовий момент інерції корпусу 1 відносно зазначеної осі миттєвого обертання.

Визначення положення центра інерції C_1 корпусу 1 вібраційної плити ВП-10, та алгоритм вирішення прикладної задачі статички викладено в попередніх матеріалах [10].

Підставляючи знайдені величини V_{C_1} , I_1 і ω_1 у формулу (7) та перетворюючи, дістанемо:

$$T_1 = \frac{m_1}{2} \cdot (\dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2) - m_1 \cdot \ell_1 \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\beta_1 + \theta) - m_1 \cdot \ell_1 \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\beta_1 + \theta) + (I_1 + m_1 \cdot \ell_1^2) \cdot \frac{\dot{\theta}^2}{2}. \quad (8)$$

Врахуємо, що згідно з теоремою Штейнера-Гюйгенса [11] в останньому доданку отриманого виразу множник

$$I_1 + m_1 \cdot \ell_1^2 = I_{1C}, \quad (9)$$

де I_{1C} – момент інерції корпусу 1 відносно осі Ω миттєвого обертання плити 4, яка проходить через точку C .

Надамо T_1 вигляду:

$$T_1 = \frac{m_1}{2} \cdot (\dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2) - m_1 \cdot \ell_1 \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\beta_1 + \theta) - m_1 \cdot \ell_1 \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\beta_1 + \theta) + J_{1C} \cdot \frac{\dot{\theta}^2}{2}. \quad (10)$$

Аналогічно до визначення T_1 послідовно встановлюємо, що після відповідних перетворень:

$$T_2 = \frac{m_2 \cdot V_{C_2}^2}{2} + \frac{I_2 \cdot \omega_2^2}{2}, \quad (11)$$

де v_{C_2} – модуль швидкості центра C_2 інерції корпусу 2 *віброзбуджувачі*; модуль миттєвої кутової швидкості корпусу 2 навколо осі його миттєвого обертання.

$$\vec{V}_{C_2} = \vec{V}_C + \vec{V}_{CC_2}, \quad (12)$$

де $\vec{V}_{CC_2}$ – вектор лінійної швидкості точки C_2 в обертальному русі корпусу 2 навколо обраного полюса C .

$$v_{CC_2} = \ell_2 \cdot \omega_2 = \ell_2 \cdot \dot{\theta}, \quad (13)$$

де $\ell_2 = CC_2$ – радіус обертання точки C_2 навколо полюса C .

Після перетворень

$$V_{C_2}^2 = \dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2 - 2\ell_2 \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\beta_2 + \theta) - 2\ell_2 \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\beta_2 + \theta) + \ell_2^2 \cdot \dot{\theta}^2. \quad (14)$$

звідси формули набувають вигляду:

$$m_R = \frac{\pi \cdot R_2^2}{\pi \cdot [R_2^2 - (R_2 - \delta_2)^2]} \cdot m_2 = \frac{R_2^2}{R_2^2 - (R_2 - \delta_2)^2} \cdot m_2, \quad (20)$$

$$m_r = \frac{\pi \cdot (R_2 - \delta_2)^2}{\pi \cdot [R_2^2 - (R_2 - \delta_2)^2]} \cdot m_2 = \frac{(R_2 - \delta_2)^2}{R_2^2 - (R_2 - \delta_2)^2} \cdot m_2. \quad (21)$$

Підставляючи ці значення у формулу (18), дістанемо:

$$\begin{aligned} I_2 &= m_R \cdot \frac{R_2^2}{2} - m_r \cdot \frac{(R_2 - \delta_2)^2}{2} = \\ &= \frac{m_2}{2} \cdot [R_2^2 + (R_2 - \delta_2)^2] = \frac{m_2}{2} \cdot [R_2^2 + (R_2^2 - 2 \cdot R_2 \cdot \delta_2 + \delta_2^2)] \end{aligned} \quad (22)$$

Остаточно:

$$I_2 = \frac{m_2}{2} \cdot (2 \cdot R_2^2 - 2 \cdot R_2 \cdot \delta_2 + \delta_2^2). \quad (23)$$

Підставляючи знайдені величини v_C^2 , J_2 і ω_2 у формулу (11) та перетворюючи, дістанемо:

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{m_2}{2} \cdot (\dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2) - m_2 \cdot \ell_2 \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\beta_2 + \theta) - m_2 \cdot \ell_2 \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\beta_2 + \theta) + \\ &+ (I_2 + m_2 \cdot \ell_2^2) \cdot \frac{\dot{\theta}^2}{2}, \end{aligned} \quad (24)$$

де згідно з теоремою Штейнера-Гюйгенса [11] момент інерції I_{2C} корпусу 2 відносно осі Ω миттєвого обертання плити 4, яка проходить через точку C

$$I_{2C} = I_2 + m_2 \cdot \ell_2^2. \quad (25)$$

З урахуванням цього отримаємо:

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{m_2}{2} \cdot (\dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2) - m_2 \cdot \ell_2 \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\beta_2 + \theta) - m_2 \cdot \ell_2 \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\beta_2 + \theta) + \\ &+ I_{2C} \cdot \frac{\dot{\theta}^2}{2}. \end{aligned} \quad (26)$$

Для визначення T_5 розкладемо складний рух дебалансу 5 на переносний разом із корпусом 2 вібробудувача та відносний рух, який здійснюється разом із дебалансним валом 3, щодо зазначеного корпусу. Переносний рух є плоскопаралельним.

$$T_5 = \frac{m_5 \cdot v_{C_5}^2}{2} + \frac{I'_5 \cdot \dot{\phi}^2}{2}, \quad (27)$$

де v_{C_5} – швидкість центра мас C_5 дебалансу 5; J'_5 – його момент інерції відносно осі, що проходить через його центр мас паралельно осі обертання дебалансного вала 3.

За теоремою про швидкості точок при плоскопаралельному русі [11] вектор абсолютної швидкості точки C_5

$$\vec{v}_{C_3} = \vec{v}_{C_2} + \vec{v}_{C_2C_3}, \quad (28)$$

де $\vec{v}_{C_2}$ – вектор швидкості точки C_2 ; $\vec{v}_{C_2C_3}$ – вектор лінійної швидкості точки C_3 в обертальному русі дебалансу 5 навколо обраного полюса C_2 яка показана на рис. 3.

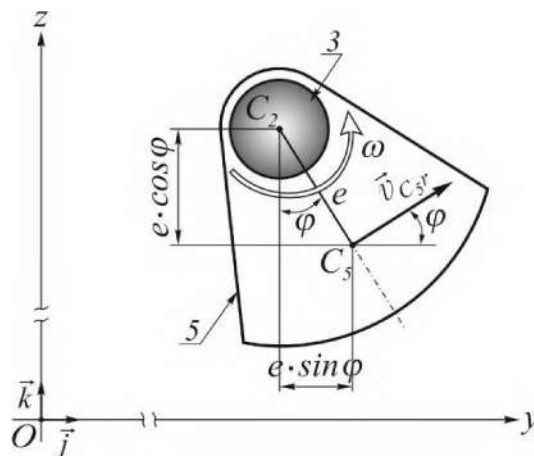


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення швидкості точки C_3

Підносячи до квадрата отриманий вираз й перетворюючи, матимемо:

$$\begin{aligned} v_{C_3}^2 = & \dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2 - 2 \cdot \ell_2 \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\beta_2 + \theta) + 2 \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi - \\ & - 2 \cdot \ell_2 \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\beta_2 + \theta) - 2 \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi - \\ & - 2 \cdot \ell_2 \cdot e \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin(\beta_2 + \theta - \phi) + \ell_2^2 \cdot \dot{\theta}^2 + e^2 \cdot \dot{\phi}^2. \end{aligned} \quad (29)$$

Підставляючи знайдене значення $v_{C_3}^2$ у формулу (27), отримаємо:

$$\begin{aligned} T_5 = & \frac{m_5}{2} \cdot [\dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2 - 2 \cdot \ell_2 \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\beta_2 + \theta) + 2 \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi - \\ & - 2 \cdot \ell_2 \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\beta_2 + \theta) - 2 \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi - \\ & - 2 \cdot \ell_2 \cdot e \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin(\beta_2 + \theta - \phi) + \ell_2^2 \cdot \dot{\theta}^2] + \frac{m_5}{2} \cdot e^2 \cdot \dot{\phi}^2 + \frac{J'_5 \cdot \dot{\phi}^2}{2}. \end{aligned} \quad (30)$$

Перетворивши два останні доданки до вигляду:

$$\frac{\dot{\phi}^2}{2} \cdot (m_5 \cdot e^2 + J'_5) = \frac{\dot{\phi}^2}{2} \cdot (J'_5 + m_5 \cdot e^2) \quad (31)$$

Як бачимо, що за теоремою Штейнера-Гюйгенса [11] сума $J'_5 + m_5 \cdot e^2 = J_5$, де J_5 – момент інерції дебалансу 5 відносно осі обертання дебалансного вала 3, через що:

$$\frac{m_5}{2} \cdot e^2 \cdot \dot{\phi}^2 + \frac{J'_5 \cdot \dot{\phi}^2}{2} = \frac{J_5 \cdot \dot{\phi}^2}{2}. \quad (32)$$

Надамо T_5 вигляду:

$$\begin{aligned}
T_5 = & \frac{m_5}{2} \cdot (\dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2) - m_5 \cdot \ell_2 \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\beta_2 + \theta) + m_5 \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi - \\
& - m_5 \cdot \ell_2 \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\beta_2 + \theta) - m_5 \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi - \\
& - m_5 \cdot \ell_2 \cdot e \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin(\beta_2 + \theta - \phi) + \frac{m_5}{2} \cdot \ell_2^2 \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{I_5}{2} \cdot \dot{\phi}^2.
\end{aligned} \quad (33)$$

Підставляючи значення, що визначають формули (6), (10), (26) і (33) в формулу (1) та здійснюючи легітимні перетворення, дістанемо кінетичну енергію T механічної системи у вигляді суми 13 доданків:

$$\begin{aligned}
T = & \frac{M}{2} \cdot \dot{y}_C^2 + \frac{M}{2} \cdot \dot{z}_C^2 - \\
& - m_1 \cdot \ell_1 \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\beta_1 + \theta) - (m_2 + m_3) \cdot \ell_2 \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\beta_2 + \theta) + \\
& + m_5 \cdot e \cdot \dot{y}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \cos \phi - m_1 \cdot \ell_1 \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\beta_1 + \theta) - \\
& - m_2 \cdot \ell_2 \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\beta_2 + \theta) - m_3 \cdot \ell_2 \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\theta} \cdot \cos(\beta_2 + \theta) - \\
& - m_5 \cdot e \cdot \dot{z}_C \cdot \dot{\phi} \cdot \sin \phi - m_3 \cdot \ell_2 \cdot e \cdot \dot{\theta} \cdot \dot{\phi} \cdot \sin(\beta_2 + \theta - \phi) + \\
& + \frac{I}{2} \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{m_5 \cdot \ell_2^2}{2} \cdot \dot{\theta}^2 + \frac{I_5}{2} \cdot \dot{\phi}^2,
\end{aligned} \quad (34)$$

де $M = m_1 + m_2 + m_4 + m_5$ – загальна маса механічної системи, що моделює вібротривоу ВП-10, рух якої генерує обертання дебалансу 5 масою m_5 ; $I = I_{1C} + I_{2C} + I_{4C}$ – зведений момент інерції рухомої частини вібротривоу відносно осі, що в розглядуваному положенні механічної системи проходить через точку C перпендикулярно до площини розташування системи, а доданки I_{1C} , I_{2C} і I_{4C} визначають формули (9), (25) і (3) відповідно.

Висновки. У роботі розглядається нова функціональна залежність кінетичної енергії вібраційної плити ВП-10, що враховує специфіку її конструкції. Отримана залежність кінетичної енергії вібраційної плити ВП-10 для ущільнення ґрунтів і будівельних матеріалів, яка складається з суми енергії чотирьох матеріальних тіл, що її утворюють (кінетичні енергії корпусу, корпусу віброзбуджувача, плити й дебалансу віброзбуджувача). Дані числові залежності виведені в загальній формі та дозволяють визначати кінетичну енергію подібних машин. Математична залежність є необхідною передумовою для подальшого математичного моделювання системи вібраційної плити ВП-10 за допомогою якої можна буде проаналізувати вплив складових її параметрів – геометричних і кінематичних – на процес ущільнення матеріалів для зменшення енерговитрат при віброущільненні. Ця залежність необхідна для отримання математичної моделі за допомогою методу Лагранжа другого роду, що своєю чергою може бути використана для покращення експлуатаційних характеристик вібраційної плити.

Список використаних джерел

1. Назаренко, І. І. (2007). *Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії*. КНУБА.
2. Онищенко, О., Онищенко, В., Коробко, Б., & Вірченко, В. (2017). *Будівельна техніка* (В. Онищенко, Ред.). Кондор.
3. Ярошівич, М., & Ярошівич, Т. (2010). *Динаміка розбігу вібраційних машин з дебалансним приводом*. ЛНТУ.
4. Нестеренко, М., & Чеботарьов, П. (2012). Аналіз конструктивних особливостей вібраційних машин, як передумови створення керованої вібраційної установки для поверхневого ущільнення бетонних сумішей. *Галузеве машинобудування, будівництво*, (1(31)), 267–275. https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PolNTU/8024/1/Znpgmb_2012_1_40.pdf.

5. Ланець, О. (2008). *Високоєфективні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення)*. НУ «Львівська політехніка».
6. Lyutenko, V., Orysenko, O., & Nadobko, V. (2018). Mathematical model for the manual vibration roller drive mechanism investigation. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 232. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14409>.
7. Васильєв, О., & Андрій, Я. (2023). Вібраційна машина для підготовки та ущільнення поверхонь. *Технічні науки та технології*, (4 (34), 52–60. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4\(34\)-52-60](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4(34)-52-60).
8. Павловський, М. (2002). *Теоретична механіка*. Техніка.
9. Жигилій, С. (2024). *Кінематика точки: Курс лекцій з дисципліни «Теоретична механіка» для студентів технічних спеціальностей усіх форм навчання*. ПолтНТУ.
10. Яковенко, А., Васильєв, О., & Жигилій, С. (2025). Визначення положення центра інерції порожнистого корпусу вібромашини ВП-10 та відповідного осьового моменту інерції. *Техніка будівництва*, (42), 83–92.
11. Beer, F. P., Jr, E. R. J., Mazurek, D. F., & Cornwell, P. J. (2013). *Vector mechanics for engineers: Statics and dynamics, tenth edition*. McGraw-Hill Companies, Inc. https://www.academia.edu/34846317/Statics_and_Dynamics_10th_Ed_Johnston.

References

1. Nazarenko, I.I. (2007). *Vibratsiini mashyny i protsesy budivelnoi industrii [Vibration machines and processes in the construction industry]*. Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture.
2. Onyshchenko, O. (Ed.), Onyshchenko V., Korobko B., & Virchenko, V. (2017). *Budivelna tekhnika [Construction machinery]*. Publishinhg House “Kondor”.
3. Yaroshevych, M., & Yaroshevych, T. (2010). *Dynamika rozbihu vibratsiinykh mashyn z debalansnym pryvodom [Run-up dynamics of vibrating machines with an unbalance drive]*. Lutsk National Technical University Publ.
4. Nesterenko, M.P., Chebotarov, P.M. (2012). Analiz konstruktyvnykh osoblyvostei vibratsiinykh mashyn, yak peredumovy stvorennia kerovanoi vibratsiinoi ustanovky dlia poverkhnevoho ushchilnennia betonnykh sumishei [The analysis of design features of vibrating machines, as preconditions of creation of the operated vibrating machine for superficial condensation of concrete mixes]. *Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo – Industrial engineering, construction*, (1(31)), 267–275. https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/8024/1/Znpgmb_2012_1_40.pdf.
5. Lanets, O.S. (2008). *Vysokoefektyvni vibratsiini mashyny z elektromahnitnym pryvodom (Teoretychni osnovy ta praktyka stvorennia) [High-efficiency vibrating machines with electromagnetic drive (Theoretical foundations and practice of creation)]*. National University “LvivPolytechnics”.
6. Lyutenko, V., Orysenko, O., & Nadobko, V. (2018). Mathematical model for the manual vibration roller drive mechanism investigation. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 232. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14409>.
7. Vasyliiev, O., & Yakovenko, A. (2023). Vibratsiina mashyna dlia pidhotovky ta ushchilnennia poverkhon. [Vibrating machine for surface preparation and sealing]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (4 (34), 52–60. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4\(34\)-52-60](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4(34)-52-60).
8. Pavlovsky, M.A. (2002). *Teoretychna mekhanika [Theoretical mechanics]*. Tekhnika.
9. Zhyhylii, S.M. (2024). *Kinematyka tochky: Kurs lektsii z dystsypliny «Teoretychna mekhanika» dlia studentiv tekhnichnykh spetsialnostei usikh form navchannia [Kinematics points: course of lectures on the discipline “Theoretical Mechanics”]*. Poltava National Technological University.
10. Yakovenko, A.M., Vasyliiev, O.S., & Zhyhylii, S.M. (2025). Vyznachennia polozhennia tsentra inertsii porozhnystoho korpusu vibromashyny VP-10 ta vidpovidnoho osovoho momentu inertsii [Determination of the position of the center of inertia of the hollow body of the VP-10 vibration machine and the corresponding axial moment of inertia] *Tekhnika budivnytstva - Construction Engineering*, (42), 83–92.
11. Beer, F. P., Jr, E. R. J., Mazurek, D. F., & Cornwell, P. J. (2013). *Vector mechanics for engineers: Statics and dynamics, tenth edition*. McGraw-Hill Companies, Inc. https://www.academia.edu/34846317/Statics_and_Dynamics_10th_Ed_Johnston.

Отримано 19.03.2025

Oleksii Vasyliiev¹, Andrii Yakovenko²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of branch machinery and mechatronics
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)

E-mail: a.s.vasiliev.76@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9914-5482>

²lecturer

Poltava Applied Oil and Gas College of National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)

E-mail: andrii.yakovenko95@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0818-6332>

DETERMINATION OF KINETIC ENERGY OF VIBRATING MACHINE VP-10

Vibration plates are an important element of the means of small mechanization and are widely used for layer-by-layer compaction of various materials, in particular sand, gravel, bitumen mixtures and other building components. Vibration compaction plays the key role in technological processes of construction of road surfaces, foundations and other engineering structures, providing necessary physical and mechanical properties of materials.

In this work, kinetic energy of the VP-10 vibratory plate, developed for compacting soils and building materials in conditions of limited space, was determined. Within the research, physical and mathematical modeling based on methods of applied mechanics was applied. Determination of the total kinetic energy, which is the sum of kinetic energies of individual components of the system (plate, vibration plate body, vibration exciter body and unbalance), the kinematic scheme of the equipment under study was built. The obtained functional dependence of kinetic energy is required prerequisite for further mathematical modeling of the system using Lagrange equations of the second kind. The performed analysis allows expanding the idea of the dynamics of the vibration plate and contributes to improvement of its structural and technological parameters.

Key words: vibration plate; inertia moment; vibration machine; kinetic energy; vibration exciter; debalance.

References: 11.

Ірина Іванівна Верба¹, Олександр Васильович Даниленко²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: verba.dan@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1891-7215>. ResearcherID: [ABM-1532-2022](https://orcid.org/0000-0003-1891-7215)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: alednlnk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1587-9225>. ResearcherID: [ABN-8993-2022](https://orcid.org/0000-0003-1587-9225)

ВІДНОВЛЕННЯ ВЕРСТАТОБУДУВАННЯ – УМОВА РОЗВИТКУ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

Рівень машинобудування та промислова незалежність України, а в умовах воєнного стану ще й боєздатність залежить від вітчизняного верстатобудування. Тож необхідно уявляти його стан і проблеми, які стоять перед галуззю і потребують грамотного та швидкого розв'язання. За аналізом публікацій у відкритих інформаційних джерелах названі основні причини занепаду.

Розглянуто деякі напрями змін за Стратегією цифрового розвитку інноваційної діяльності України на період до 2030 року та операційним планом заходів з її реалізації.

Головним чинником верстатобудування стане зростання внутрішнього попиту на верстати вітчизняного виробництва, тобто імпортозаміщення. Наведено деякі дії, необхідні для реалізації.

Ключові слова: верстатобудування; стратегія розвитку; імпортозаміщення; маркетинг верстатобудування; криза технічної освіти; модернізація верстатів з ЧПК; комплектуючі верстатів з ЧПК; малий бізнес у верстатобудуванні.

Рис.: 1. Бібл.: 27.

Актуальність теми дослідження. Верстатобудування визначає енергоефективність та матеріалоефективність економіки, тобто визначає собівартість виробництва. Проте ситуація у верстатобудуванні в усьому світі вже не один рік є складною і Україна не є винятком. Підгалузь верстатобудування виробляє продукцію, яка не лише забезпечує розвиток машинобудування та технологічну незалежність України, але й дає вихід на ринок міжнародної торгівлі.

Постановка проблеми. У результаті аналізу останніх досліджень і публікацій у відкритих джерелах можна зробити висновок, що зазвичай йдеться про промисловість загалом, у деяких випадках про машинобудування. А верстатобудування навіть не згадується в офіційних документах. Та й взагалі предметом розгляду є питання економічні, максимум конкретизації – маркетингові дослідження та напрямки, які доцільно застосувати для промислового підприємства, питання управління виробництвом. Усе вищезазначене подано в загальному вигляді. Беззаперечно, ці питання дуже важливі, але це лише частка проблем, які необхідно вирішувати. Та й рекомендації загальні для виробництва загалом, а що при цьому випускають – вироби аграрно-промислового комплексу, електрообладнання, транспортні засоби, навіть виконують замовлення ЗСУ – не конкретизується і не вирішені проблеми ними й лишаються.

Треба усвідомити, що ми живемо в технологічно залежній країні, яка витримала кілька етапів промислової деградації, зокрема й у машинобудуванні. Рівень машинобудування, якість, складність та продуктивність виконуваних робіт безпосередньо залежать від використовуваного обробного обладнання.

Країна, яка не має власного розвинутого верстатобудування, приречена на другорядні ролі, зокрема й тому, що не можна розвинути сучасні авіабудування, кораблебудування, космічну сферу, швидкісний транспорт, військово-промисловий комплекс без відповідного обладнання, яке навряд чи можна купити в повному обсязі.

Отже, що належить робити і з чого почати, якщо мати на меті розвиток верстатобудування?

Стаття є оглядово-інформаційною та містить аналіз публікацій і досліджень, дані про які є у відкритих інформаційних джерелах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Подолання будь-яких проблем повинно починатися з чіткого усвідомлення причин, які зумовили виникнення цих проблем. Це стосується, зокрема, і проблем із розвитком машинобудування та верстатобудування, який змінився відвертим спадом. При тому причини можуть бути за характером різні: технічні, науково-технічні, соціальні, економічні, пов'язані з особливостями конкретної країни або властиві ряду країн світу.

В умовах ринкової економіки для більшості підприємств неминучим є оновлення складу продукції й змінювання номенклатури, що характеризує перехід до гнучкого виробництва, яке є багатомономенклатурним. Саме рівень технологічного обладнання, яке використовується, забезпечує можливість швидко і за мінімальних витрат освоювати нову продукцію. Таким чином, саме верстатобудування зумовлює її конкурентоздатність.

Пріоритетність машинобудування в Україні зумовлена передусім світовим визнанням української продукції, а також наявністю системи підготовки кваліфікованих кадрів. Водночас сучасний стан машинобудування в Україні важко назвати задовільним. І почалося це задовго до початку воєнних дій. Незалежність, отримана Україною, за рахунок політичних, соціальних та економічних причин зумовила певні втрати та дезорганізованість у розвитку промисловості. До цього додалися загрози та виклики, які для всіх країн в умовах глобалізації становлять небезпеку, і зміни світової економіки (наприклад, той факт, що роботизація виробництва зумовлює безробіття). Так, Державна статистика 2019 р. свідчить про подальшу деіндустріалізацію економіки України: у машинобудуванні зафіксовано максимальне падіння (на 14,5 % відносно 2018 р.) [1]. У 2020 році частка продукції машинобудування у структурі реалізованої промислової продукції становила лише 6,98 % проти 13,70 % у 2007-му (найвище значення за період 2001-2020 років).

Державна служба статистики (Держстат) у грудні 2023 року повідомила, що порівняно із 2022 р. виробництво комп'ютерів, електронної та оптичної продукції забезпечило показник зростання на 58,8 %, виробництво гумових і пластмасових виробів – на 20,7 %, машинобудування – на 16,7 % (без врахування тимчасово окупованих територій) [2]. Значна частка промислових підприємств адаптувалася до умов роботи під час війни, але однаково залишається у важкому стані. Однак є і таке твердження: позитивна динаміка у 2023 р. пояснюється дуже низьким рівнем промисловості у 2022 р., з яким здійснюється порівняння [3].

За даними Національного інституту стратегічних досліджень, у 2023 році оборонна промисловість стала одним із найбільших драйверів відновлення економіки – вітчизняний ОПК (оборонно-промисловий комплекс) зріс утричі порівняно з 2022 роком, у 2024 році очікувалося зростання у шість разів. Активне виробництво відбувається за такими напрямками: бронетехніка, морські та радарні системи, високоточна зброя, боєприпаси, авіабудування, авіаремонт [4]. Прем'єр-міністр Денис Шмигаль повідомив, що у 2024 році Україна планує витратити на закупівлю, виробництво та ремонт озброєння щонайменше 265 млрд грн [4]. Виробництво дронів швидко стає окремою підгалуззю машинобудування. Машинобудування зростає завдяки оборонним замовленням, але нерівномірно та нестабільно [3].

Звісно, на машинобудівних заводах виробляється не лише військова техніка. Наприклад, «Укрзалізниця» та «Крюківський вагонобудівний завод», який згідно з вимогами ЄС отримав право на випуск вантажних вагонів на колію 1435 мм, підписали контракт на постачання до 30 червня 2026 р. нових пасажирських вагонів у кількості 22 одиниці. Деякі підприємства виробляють спеціальні автомобілі різного призначення з використанням імпортованих шасі [5]. Львівське підприємство «Завод ЕлектронМаш» виробляє низькопідлогові автобуси для Ужгорода (між іншим, виникає питання, як це пов'язано із типовою продукцією заводу) [3].

Взагалі статистика українського машинобудування у 2024 році [4] підтверджує певну стабілізацію стану, принаймні відсутність додаткового падіння.

Поряд з оборонно-промисловим комплексом до провідних секторів, які стануть основою відновлення української економіки, віднесено аграрну галузь, енергетику, ІТ, будівництво та машинобудування [6].

Чинний Перелік підприємств, які мають стратегічне значення для економіки й безпеки держави, що зі змінами (останні зміни внесені згідно з Постановою Кабінету Міністрів України від 16.02. 2024 № 179) діє донині [7], містить 291 об'єкт. Серед них об'єкти, що здійснюють діяльність у сфері оборони в кількості 77 об'єктів. Це підприємства машинобудування. Також Перелік містить 28 підприємств паливно-енергетичного комплексу; 50 – транспортної галузі; 29 об'єктів, що забезпечують розміщення і зберігання матеріальних цінностей державних резервів (переважно комбінати хлібопродуктів); 5 – агропромислового комплексу; 14 – зі сфери телекомунікацій та зв'язку; 15 підприємств авіаційної та ракетно-космічної промисловості; підприємств машинобудівної промисловості – 5; металургійний комплекс – 7; хімічний комплекс – 7; наукова діяльність (науково-дослідні інститути) охоплює 35 установ; сфера стандартизації, метрології та сертифікації – 5; закладів гідрометеорологічної діяльності – 1; промисловість будівельних матеріалів – 2; фінансово-бюджетна сфера – 3; харчова промисловість, легка промисловість, поліграфія, підприємства, продукція та послуги яких мають важливе соціально-економічне значення – по 1 установі; геологорозвідувальна галузь – 4 установи.

У липні 2022 р. був представлений проєкт Плану відновлення України, який так і не затвердили через фрагментарність, неоднорідність, відсутність системного підходу [3].

У системі статистичної звітності машинобудування входить у переробну промисловість, що є частиною промисловості взагалі. Підприємства, які належать до українського машинобудування об'єднують три великі групи: виробництво машин та обладнання, виробництво електрообладнання та виробництво транспортних засобів. Крім них, ще близько 100 спеціалізованих галузей, підгалузей та виробництв. І ні одного верстатобудівного заводу! То їх немає? Чи не належать до підприємств, які мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави? Опосередковано підтверджується той факт, що серед зареєстрованих вітчизняних підприємств у секторі машинобудування є значна частка малоефективних або взагалі недіючих [8].

У аналітичній доповіді на сайті Національного інституту стратегічних досліджень, [3] відзначено, що попри сталість та адаптацію значної частки промислових підприємств до складних умов роботи під час війни, промисловість залишається у важкому стані, а позитивна динаміка у 2023 р., як уже вказувалось, значною мірою зумовлена дуже низькою базою порівняння 2022 р. Відновлення у галузі гальмується як об'єктивними зовнішніми чинниками, пов'язаними з веденням бойових дій, так і цілою низкою внутрішніх проблем та перешкод, зокрема й адміністративно-організаційного характеру.

До основних обмежень розвитку у промисловості належать, зокрема, такі:

1. Економічні: ускладнення відновлення промислових підприємств через брак можливостей фінансування банківською системою, Державним та місцевим бюджетами, міжнародними організаціями; згорання інвестиційних процесів у промисловості;

2. Зупинка приватизації великих підприємств після початку пандемії у 2020 р., малих – з початком повномасштабного вторгнення РФ в Україну, що посприяло низькій ефективності роботи підприємств державної форми власності. Восени 2022 р. «малу» приватизацію було відновлено, завдяки чому держава отримала близько 2,5 млрд грн, зокрема від продажу елеваторів, спиртзаводів, хлібокомбінатів;

3. Збільшення дефіциту кадрів у промисловості: як наслідок виїзду громадян України після початку війни за кордон, мобілізації та участі в бойових діях персоналу промислових підприємств (підтверджено Державною службою зайнятості).

Міністр економіки України Юлія Свириденко у своєму виступі у Верховній Раді 4 листопада 2021 р. перелічила пріоритетні напрямки розвитку української економіки: відновлення машинобудування, імпортозаміщення, розвиток індустріальних парків та інформаційних технологій.

Поза всяким сумнівом, для незалежності України всі перераховані напрямки є актуальними та першочерговими.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Усе зазначене вище є важливим і має значення для промисловості України, зокрема і для машинобудування, але сформульовано в загальному вигляді й безпосередньо верстатобудування як такого не стосується. Навіть спільні питання та напрямки мають свої особливості для конкретної галузі. І аналізувати треба ці відмінності, при тому із залученням технічних фахівців – інакше це просто розмови й переважно ні про що.

Метою статті є аналіз показників розвитку верстатобудування України та дослідження стану й тенденцій розвитку верстатобудівної галузі в сучасних умовах ринкової економіки в Україні та у світі. Кінцевою метою є виокремлення серед причин та наслідків падіння рівня машинобудування і, зокрема, верстатобудування, ті, що пов'язані з науково-технічними та інженерними кадрами й визначаються їхніми діями, а також орієнтовне визначення таких дій, які могли б вплинути на ситуацію: маються на увазі підходи передусім до модернізації та осучаснення верстатів з ЧПК, які знаходяться в експлуатації або просто не належать за своїми характеристиками до суперсучасного обробного обладнання та, можливо, і зараз виробляються в Україні.

Виклад основного матеріалу. Згадаємо не таке вже давнє минуле. До 1990 р. Україна за обсягом випуску верстатів була на 11-му місці у світі. В Україні працювали верстатобудівні заводи, які повністю задовольняли попит країни у верстатах і продукція яких йшла на експорт. Реальний ринок продукції верстатобудування, який забезпечений платоспроможним попитом, зараз складає 30-35 % від потенційно необхідного [9].

В Україні верстати токарної групи, зокрема верстати-автомати, випускалися Київським і Житомирським заводами, Мелітопольським, до певного часу – Бердичівським; свердлильної групи – Одеським заводом радіально-свердлильних верстатів; фрезерної групи – Одеським, Львівським; шліфувальної групи – Харківським, Лубенським, зубообробної групи – Корсунь-Шевченківським; стругально-довбальної групи – Одеським заводом, агрегатні верстати – Харківським та Глухівським заводами.

Проте ще на початку 90-х років одночасно зі спадом промислового виробництва, коли суттєво впав рівень рентабельності та спостерігався надзвичайно низький рівень інновацій, почалася криза у верстатобудівній галузі.

Коли Україна отримала статус незалежної держави й почався перехід до ринкової економіки, багато підприємств потрапили у складне становище або взагалі зникли чи були реструктуризовані (поділені на кілька окремих підприємств) через те, що виявились неспроможними здійснювати рентабельну діяльність у нових умовах. Саме невеликі підприємства частково змогли пристосуватися. Однією з головних причин цього поряд із зістаренням технологічної бази стало припинення державного фінансування підприємств та різке скорочення обсягів держзамовлень. Відіграло свою роль невміння підприємств працювати у ринкових умовах, зокрема відсутність розвинутого маркетингу.

Після 1990 року виробничі потужності підприємств верстатобудування використовувались не повною мірою. Обсяг виробництва продукції з 1990 до 2009 р. скоротився майже в 16 разів, і лише у 2009 р. намітилися позитивні зрушення. Відбулися зміни й у

структурі випуску цієї продукції. Зменшилася питома вага металорізальних верстатів з 65,6 до 37,7 % та ковальсько-пресового обладнання з 19,2 до 10,5 %, водночас значно виросла частка деревообробного з 14,6 до 49,6 % та ливарного устаткування – 0,7 до 2,2 %. Реальний ринок продукції верстатобудування, який забезпечений платоспроможним попитом, складає 30-35 % від потенційно необхідного [9].

На цей час існував певний чималенький запас обладнання з минулих часів, а от кількість нових верстатів, виробництво освоювались, впала у 6 разів, тобто ступінь старіння засобів виробництва переважав ступінь його відновлення. Фізичний знос промислового обладнання у верстатобудуванні перевищує 50 %, частка вітчизняних обробних центрів з ЧПК незначна. Наслідком є цілком очікуване зменшення номенклатури верстатів, які ще випускаються на тих небагатьох верстатобудівних заводах, які вціліли серед цього спустошення.

Українське верстатобудування втратило свої позиції серед світових виробників обладнання, а вітчизняний ринок тепер відчутно залежить від іноземних постачальників, які практично його заповнили. На сьогодні майже всі названі вище верстатобудівні підприємства знищені або змінили орієнтацію виробництва і виробництво верстатів у кращому випадку складає незначну частину, переважно під замовлення.

Можна навести деякі факти, що підтверджують ситуацію. Згідно із Постановою Кабінету Міністрів України № 911 від 21 серпня 1997 р. (втратила чинність 29.08.2000) «Про затвердження переліку підприємств, які мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави» [10], яка в розділі Міністерство промислової політики містить 675 підприємств різного типу, а конкретно верстатобудівних лише 12. В аналогічній постанові № 1734 від 23.12.2004 р. [11] вже 257 підприємств і всього 3 верстатобудівних підприємства.

Наведемо ще такий приклад. В обидві Постанови входить Державний конструкторсько-технологічний центр верстатобудування, який займається розробкою та впровадженням технологій у верстатобудуванні, а також проводить наукові дослідження в цій галузі. Його метою є забезпечення конкурентоспроможності вітчизняної продукції на ринку. Але у Витягу з ЄДР у 2024 р. читаємо: основний вид діяльності – згідно з КВЕД 73.10: Дослідження та розробки в галузі природничих та технічних наук; інші види діяльності – створення програмного забезпечення, ремонт (спеціалізований) верстатів, виробництво технологічного оснащення для верстатів [12].

Певні верстати полишають споживчий ринок через інші принципи використання обладнання: зокрема, верстати для грубої обробки (наприклад, середні фрезерні для обробки литва, бо те литво переважно стало якіснішим та доволі точним) або верстати, що мають невисоку продуктивність (наприклад, стругальні), чи навпаки надпотужні верстати обмеженого застосування та автоматичні лінії – явно простежується необхідність переходу на нову модель верстатобудівного підприємства: компактне, з динамічним циклом виробництва, яке може швидко переналагоджуватися, з досвідом агрегатно-модульного конструювання здебільшого з використанням мехатронних вузлів та відповідних складових систем керування, які обирають за потребою, зокрема для приводів формують-воруючих рухів. Фактично верстатобудівний завод повинен мати кваліфіковані інженерні кадри, які здатні розробляти компонування верстатів, конструкцію несучої системи та виконувати аналіз її напружено-деформованого стану в разі використання обраних вузлів (скоріш за все – покупних) або здійснювати моделювання систем.

Втім запит на продукцію вітчизняного верстатобудування існує. До того ж треба враховувати чималу кількість невеликих машинобудівних підприємств, що успішно випускають продукцію, яка не є дрібносерійною (тобто в цьому випадку потреба в багатоцільовому обладнанні менша, як мінімум менші вимоги до їхніх можливостей) та до якої не ставлять підвищені вимоги, наприклад, за точністю, або підприємства, що здійснюють ремонти.

Однак одночасно на багатьох промислових підприємствах виникає нагальна потреба в новому сучасному обладнанні, тож для його проєктування та виготовлення верстатобудування потребує докорінної перебудови підприємств із залученням сучасних технологій.

Верстатобудівне виробництво переорієнтувалося з масового випуску однотипних верстатів (від початку виробництва до повного завершення) на зменшені партії. Розробки нових верстатів скоріше орієнтовані на складання верстата з використанням модульних вузлів, ніж на безпосереднє виробництво. Відбувається свого роду розподіл праці і створюються спеціалізовані підприємства, орієнтовані на виробництво окремих спеціалізованих вузлів типу напрямних кочення, шпиндельних вузлів, кулькових гвинтових пар тощо. Раніше до подібних вузлів можна було віднести хіба що керовані електродвигуни, автоматизовані електроприводи, зокрема й з механічними перетворювачами.

Підприємство стикається не лише з технологічними проблемами, а із суто економічними, бо подібне обладнання є вартісним. З іншого боку, якщо не займатися технологічним переозброєнням, то це шлях в нікуди.

Існує Каталог компаній України в галузі машинобудування згідно з класифікацією видів економічної діяльності (КВЕД). КВЕД 28.41 – Виробництво металообробних машин – стосується виробництва верстатів для оброблення металів не лише різанням, а різними методами, такими як лазерний, ультразвуковий, плазмовий та інші. Цей клас також може включати виробництво інших верстатів, пов'язаних з металообробкою. У перелік входять також невеликі підприємства, які ідентифікуються за особою ФОП. Це підприємства переважно ремонтні або спеціалізуються на виконанні індивідуальних замовлень. На кінець 2023 р. КВЕД 28.41 охоплював 193 компанії, які діють у різних областях України: 142 юридичні особи (підприємства) разом із 51 ФОПами.

Позначено: Харківська область – 29; Київ – 27; Одеська область – 18; Дніпропетровська область – 16; Запорізька область – 10; Миколаївська область – 10; Закарпатська область – 9; Львівська область – 8; Черкаська область – 8; Житомирська область – 6; Івано-Франківська область – 6; Київська область – 6; Полтавська область – 6; Волинська область – 5; Луганська область – 5; Вінницька область – 4; Хмельницька область – 4; Донецька область – 3; Тернопільська область – 3; Чернігівська область – 3; Автономна Республіка Крим – 2; Кіровоградська область – 2; Сумська область – 1; Херсонська область – 1; Чернівецька область – 1.

На рис. 1 наведено мапу України з поділом на області та вказаною кількістю верстатобудівних компаній [13].

Достовірність даних викликає певний сумнів. Наприклад, вказана як існуюча ПРАТ «Фірма БЕВЕРС», де у 2023 р. працювало 8 осіб [14], що наглядали над здачею в оренду площі заводської території та розпродували залишки майна.

Оцінки та прогнози товарних аналітиків не завжди однозначно визначають ситуацію на ринку. Щодо оцінки глобального ринку верстатів для обробки металевих або інших твердих матеріалів протягом 2021-2026 рр., то існують прогнози як на збільшення, так і на зменшення, та ще й вказані різні очікувані вартості [4]. За світовими прогнозами найбільший внесок у збільшення експорту обладнання очевидно внесуть постачання обробних центрів і токарних верстатів. А от згідно з даними Державної служби статистики України найбільше зменшення експорту мало місце саме в товарній позиції «Центри обробні» (–62,7 %) через їхню невідповідність потрібному рівню показників працездатності. Але в будь-якому разі оцінка економічних показників та статистичних даних після світового спаду промислового виробництва свідчить про певну стабілізацію ринку у 2020 р.

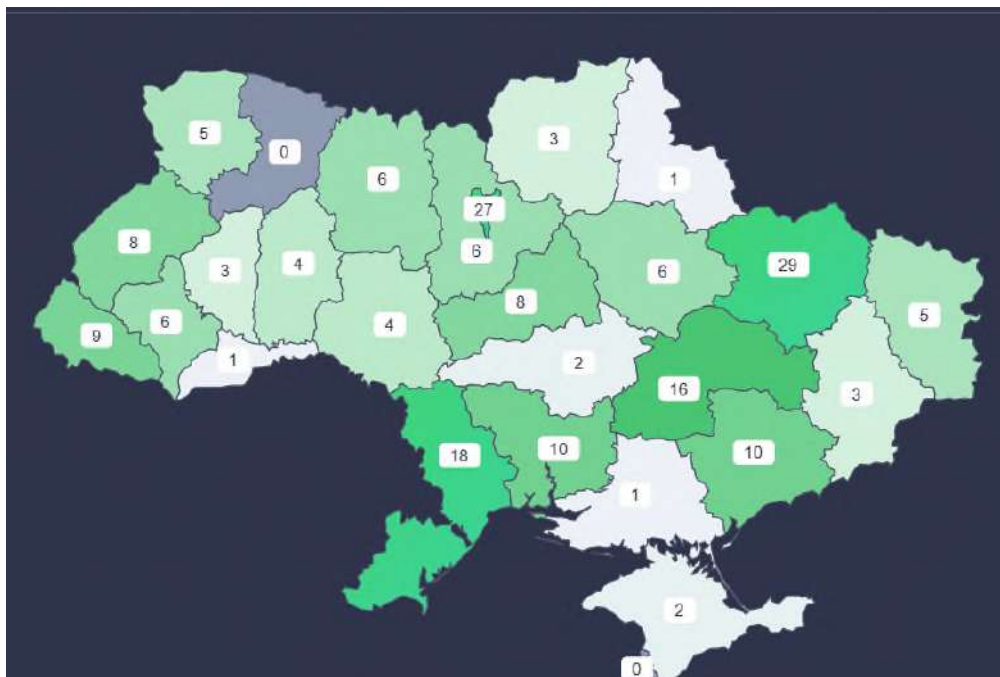


Рис. 1. Мапа України з вказаною кількістю верстатобудівних підприємств по областях на кінець 2023 р. [13]

Якщо не заглиблюватися у подробиці, то досить того, що виразно помітна сумна тенденція. Звісно, можна відзначити й виникнення нових підприємств, наприклад, ТОВ ГУЦОЛ ІНДАСТРІАЛ (Київ), яке займається продажем фрезерних, токарних, шліфувальних, вимірювальних, лазерних машин та ерозійних верстатів з ЧПК, листозгинальних верстатів з ЧПК, оснащення та інструменту; До сфери їхньої діяльності входить вирішення проблем з верстатами протягом усього періоду їх експлуатації, пусконаладжувальні роботи, гарантійне обслуговування, модернізація верстатів з ЧПУ [15], виробництво металообробних верстатів (переважно на замовлення). Тож виробництво власних верстатів, навіть не суперсучасних, явно не є основним видом їхньої діяльності.

Інформація у відкритих інформаційних джерелах подана найчастіше без дат, без пояснень та подробиць, без будь-якої конкретизації (скоріш за все автори не є інженерами-верстатниками), але певне враження справляє і дозволяє робити деякі якісні висновки. Але можна ознайомитись і з доволі докладним аналізом стану вітчизняного верстатобудування та тенденцій його розвитку, зокрема й серед інших галузей машинобудування, а також із можливими напрямками й перспективами, наприклад, [16].

Значна кількість публікацій присвячена багатокритеріальній оцінці конкурентоздатності продукції машинобудування та продукції верстатобудування, концепції проєктів, маркетинговим дослідженням конкурентоздатності і прогнозуванню технічних характеристик металорізальних верстатів, створенню конкурентоздатних верстатів та методиці їхньої порівняльної оцінки. Варто пам'ятати, що існує міжнародний ринок наукоємної продукції, торгівля сучасними технологіями, які залежать від інноваційної системи та винахідницької активності і передбачають налагоджену комерціалізацію результатів науково-дослідних та конструкторських розробок [17; 18].

Наприклад, світові тенденції свідчать, що все зростаюча номенклатура і кількість типорозмірів спеціалізованих та багатофункціональних верстатів призвели до того, що жодна країна не може задовольнити свої потреби у цій техніці за рахунок власного виробництва [19].

Навіть вибірковий аналіз законів та розпоряджень, які прийняті Верховною Радою та Кабінетом Міністрів України, аналітичних оглядів Національного інституту стратегічних досліджень, статей, які доступні у відкритих джерелах, дозволяє зробити висновок про першочергову увагу до питань економіки, маркетингу [16; 20], управління підприємством тощо. Хтось із цим не погоджується? Навряд чи. Але чим управляти? Маркетингові дослідження діяльності яких підприємств виконувати, якщо їх немає? Якимось про підприємства конкретних галузей, про проблеми конкретного виробництва не дуже ведуть розмови. А хто буде розроблювати оті інноваційні проєкти обладнання? Або хоча б грамотно експлуатувати покупне імпортерне обладнання? Де фахівці? Хто й на базі чого їх готує? Питання, питання ...

Стратегія цифрового розвитку інноваційної діяльності України на період до 2030 року та затверджений 31.12.2024 р. операційний план заходів з її реалізації [19] передбачають поетапне досягнення стратегічних цілей у 2025-2027 рр. та у 2028-2030 рр. Перший етап передбачає створення сприятливих умов для розвитку інноваційної діяльності: вдосконалення законодавчої бази, підтримку наукових досліджень і розробок, розвиток інфраструктури для стартапів та сприяння трансферу технологій, а також рекомендації щодо реформування всіх рівнів освіти, насамперед професійно-технічної [21].

Проаналізуємо деякі положення та напрямки змін.

1. Системи управління. Як недолік традиційних систем управління спеціалісти називають їхню функціональну орієнтацію та конкретну регламентацію процесів управління. У сучасних умовах важливішими є взаємозв'язок окремих ланок системи управління залежно від обраної мети з обов'язковим використанням інформаційних технологій (за підтримки програмних засобів), спрямованих на моделювання підприємства з врахуванням критеріїв функціонування, дослідження діяльності підприємства, вдосконалення не лише об'єкту виробництва, який є швидко змінним, а й адаптацію до умов самої бізнес-системи.

Таким чином, йдеться про створення обґрунтованої імітаційної моделі підприємства з врахуванням усіх напрямків та параметрів діяльності в певному діапазоні умов, зокрема автоматизації на всіх рівнях, логістики, обліку, проєктування, досліджень тощо. Імітаційна модель підприємства застосовується для якісного й кількісного аналізу та визначення конкретних критеріїв його функціонування і факторів впливу. У разі реконструкції підприємства вносяться зміни в існуючу технологічну схему виробництва з метою розширення можливостей і з врахуванням того, що значна частина обладнання вже встановлена і потребує заміни чи модернізації, тобто енергетичних та капітальних витрат

2. Результативна науково-технічна діяльність є умовою інноваційного розвитку як України в цілому, так і конкретно верстатобудування. Крім того, що необхідно стимулювати розвиток науки й техніки, зокрема й фінансово, треба потурбуватися про те, щоб наука, техніка й виробництво утворювали єдину систему зі спільним розвитком. Технічні науки належать до систем із самоорганізацією та адаптацією до зовнішніх впливів. Сьогодні відбувається перехід на повністю автоматизоване виробництво з інтелектуальними системами керування, масове впровадження інформаційних технологій. Забезпечення системної координації розвитку інноваційної та цифрової інфраструктури у промисловості, розвиток Індустрії 4.0 – один зі шляхів, що для України має особливе значення з огляду на воєнний стан: в умовах впровадження жорстких обмежувальних заходів у діяльності підприємств та транспортних обмежень життєздатність багатьох промислових виробництв є прямо пропорційною рівню автоматизації та цифровізації виробничих та управлінських процесів. Згідно із рейтингом готовності до Індустрії 4.0, що складається Всесвітнім економічним форумом (WEF), Україну відносять до групи незрілих країн із високими ризиками, відводячи їй 67-ме місце серед 100 країн світу в категорії “рушії

промислового розвитку” [8]. Індустрія 4.0 в Україні розвивається, хоч і уповільнено через недостатню фінансову підтримку держави, а зараз ще гальмує воєнний стан.

Вирішенню цієї проблеми має сприяти розроблена у 2021 р. Міністерством з питань стратегічних галузей промисловості України Стратегія розвитку цифрової інфраструктури стратегічних галузей промисловості, оборонно-промислового комплексу України на період до 2025 р. Стратегію на строк 2025-2030 рр. затвердили 31.12.2024 [19]. В Україні розвивається Індустрія 4.0, хоч і повільніше через недостатню фінансову підтримку держави, а зараз ще гальмує воєнний стан [22, 23, 24].

3. Обґрунтування шляхів реконструкції діючого підприємства або створення нового та критеріїв їхньої оцінки з погляду досягнутих технічних результатів та супроводжуючих витрат. За реконструкції діючого підприємства першою задачею є визначення напрямку змін та нових об’єктів виробництва за умови, що частина технологічного обладнання вже заздалегідь встановлена і це необхідно враховувати, плануючі зміни. І в разі реконструкції підприємства, яке працює, але є необхідними та запланованими певні змінювання існуючої технологічної схеми, і при виконанні початкового проєкту, який не спирається на існуючі технологічні схеми та обладнання, що не є дуже сучасним, але його все одно застосовують, існують різні можливі шляхи реконструкції і необхідно обрати критерії, які будуть застосовані. І мова не лише про вибір технологічного обладнання й обробного інструмента. Наприклад, розраховують вартість спожитої енергії: проєктування теплових систем, які характеризуються мінімальним споживанням енергії, – одна з найскладніших технічних проблем як при реконструкції, так і при початковому проєктуванні.

Оцінюють техніко-економічні фактори щодо впровадження технологічних комплексів на базі верстатів з ЧПК замість традиційних для серійного виробництва універсальних верстатів: аналізують скорочення тривалості обробки, підвищення продуктивності, здешевлення виробництва та окупність витрат на обладнання більш високої вартості, а насправді мають невідповідність цих прогнозів реальним результатам впровадження вартісного обладнання. Ця ситуація, ймовірно, є наслідком помилок в проєктуванні технологічних комплексів з використанням верстатів з ЧПК через відсутність необхідних даних щодо їхньої фактичної працездатності (дослідження на підприємствах [25] показали коефіцієнт екстенсивного використання обладнання з ЧПК 0,3-0,5, це частка часу продуктивної роботи в дійсному фонді часу), методик розрахунків і порівняльного аналізу та рекомендацій, наприклад, щодо необхідних складу, типу, кількості верстатів з умови забезпечення їхнього завантаження.

Справжня вартість нового верстата містить також витрати на демонтаж, відключення й переміщення чи вивіз за межі підприємства старого верстату; витрати на транспортування нового верстата; витрати на придбання нового оснащення чи інструменту – в разі потреби; витрати часу на підготовку робітників та обслуговуючого персоналу, які можуть зумовити тимчасове зменшення обсягів виробництва. Проте в разі інвестицій у комп’ютерні системи ЧПУ нового або модернізованого верстата буде забезпечено швидке ознайомлення із новими верстатами та нюансами їхньої експлуатації, зростання продуктивності праці, зменшення витрат часу завдяки безлюдній технології та можливості одночасного обслуговування кількох верстатів персоналом не дуже високої кваліфікації.

4. Виконання конструкторських розробок та дій, пов’язаних з заміщенням імпортного обладнання, яке використовується.

Не буде відкриттям, коли вказати, що принципово існують такі шляхи вирішення проблеми підйому у верстатобудуванні та загалом у машинобудуванні [25]:

1. Оновити та переобладнати парк технологічного обладнання за рахунок придбання верстатів з пошуком найбільш придатних з умов задовільного виконання потрібних функцій та за задовільною ціною (йдеться зазвичай про вартісне обладнання відомих верстатобудівних фірм та оцінку його рентабельності у ваших конкретних умовах).

Альтернативою є створення спільних верстатобудівних підприємств із сьогодишніми лідерами світового верстатобудування та локалізація виробництва на території України. Це найперспективніший шлях, якщо йдеться про спеціальне важке й високоточне ($1 \dots 0,1$ мкм) обладнання. А саме таке обладнання є особливо вартісним і потрібним у наукоємних галузях промисловості, наприклад, в оборонних та авіаційно-космічних.

2. Виконувати та підтримувати проекти, які забезпечують імпортозаміщення технологічного обладнання новими українськими верстатами або модернізованими й осучасненими (до речі, такі дії також вимагають вкладання певних чималих коштів, а також, що, може, навіть важливіше, – немалих витрат часу і наявності фахівців). Цей шлях передбачає відновлення та технічне переобладнання власних верстатобудівних підприємств. Такі підприємства можуть бути орієнтовані на виробництво універсального обладнання з ЧПК середньої вартості, середніх масогабаритних параметрів, середньої точності ($0,02 \dots 0,001$ мм).

3. Розвиток малого й середнього підприємництва: виробництво малогабаритного серійного обладнання для побутових, навчальних, ремонтних потреб, а також виробництво мехатронних вузлів різного призначення. Перевагами є низька вартість (більш ніж удвічі) та рентабельність виробництва. Використання точних мехатронних модулів розширює технологічну гнучкість обладнання для вирішення конкретної задачі. Точність обладнання становить $0,05 \dots 0,02$ мм, а область використання доволі значна.

Названі шляхи передбачають розробку інвестиційних проєктів. Деякий підйом у галузі зумовив певне незначне зростання конкурентоздатності вітчизняних верстатів на внутрішньому ринку, але Україна вимушена обрати той шлях, яким розвивається верстатобудування у світі. У сучасних умовах це означає імпортування нового верстатного обладнання за одночасних намагань реструктурувати підприємства. Як приклад можна навести ВАТ «Харверст», який з 2001 р. працює з новим інвестором – Українською промисловою енергетичною корпорацією і задачею стало створення гнучкого сучасного високоефективного підприємства згідно з маркетинговими дослідженнями та відповідно до розробленого плану.

Проблема заміщення імпорту й у верстатобудуванні, як і загалом у машинобудуванні, стоїть гостро. Вітчизняний ринок верстатів залежить від іноземних постачальників – Німеччини, Італії, Японії, Китаю, Тайваню. З'являються і нові зарубіжні компанії. У принципі існують вітчизняні верстати, які є чи були донедавна об'єктом експорту, наприклад, у Казахстан чи Китай. Наявна інформація [10] навіть про зростання експорту продукції верстатобудування (питання: якої саме?) з 1997 до 2009 р. втричі. На жаль, на виробництво сучасного високотехнологічного обладнання наші виробники вийти не змогли. Але плани є, і вони поступово будуть реалізовуватися.

Зростає конструктивна складність виробів, складність форми, вага виробів (це власне переважно так званому «унікальному машинобудуванню» типу атомної промисловості, ракетно космічної, важкої енергетики), а робітників унікальної кваліфікації не вистачає. Саме багатофункціональні й багатокоординатні верстати з ЧПК дозволяють не лише забезпечити високі й стабільні параметри якості, а й забезпечують концентрацію операцій, яка зумовлює зростання продуктивності, зокрема й за рахунок скорочення допоміжного часу операцій, що є несумісними. При тому порівняно із сумою штучного часу на обробку послідовно виконуваних операцій ця економія становить (300-400) % для токарних чи фрезерних верстатів [26].

Головна – і обов’язкова! – умова імпортозаміщення полягає в наявності найсучасніших верстатів з ЧПК власного виробництва, які наразі відсутні. Якщо навіть не всі, то переважна більшість подібних верстатів надходить з-за кордону. Власного верстатобудування та інструментальної промисловості для заводів військово-промислового комплексу фактично не існує. Також не радує ситуація з висококваліфікованими робітниками, насамперед операторами верстатів з ЧПК, без яких неможливо здійснити значне технічне переозброєння. Вища освіта є одним з факторів прогресу й розвитку держави. Це стосується повною мірою і технічної освіти. В Україні констатується інтелектуальна деградація, яка певною мірою пояснюється зменшенням частки очного навчання як у школах, так і в закладах середньої та вищої освіти, переважає суто теоретичне ознайомлення із питаннями, які розглядаються. Фінансування на створення реальної бази для проведення лабораторних робіт для ознайомлення із сучасним обладнанням та вимірювальною технікою тощо може й передбачене, а чи отримують його кафедри, які здійснюють безпосередню підготовку технічних спеціалістів? Є певні рекомендації стосовно необхідних дій [27], але це в багатьох випадках «голос у пустелі». Основні рішення в багатьох випадках ухвалюють люди, які далекі від техніки й багато чого уявляють у загальному вигляді, все зводиться до купи звітної інформації, яка часто передбачає ті самі ж дані в різному оформленні, до масового впровадження непродуманих реформ.

Можна виділити такі причини падіння рівня верстатобудування (ті самі, що й загалом для машинобудування):

1) нові вимоги користувачів до показників працездатності верстатів, до серійності випуску продукції (тобто в першу чергу до технологічної гнучкості);

2) поява нових оброблювальних матеріалів та відповідних обробних інструментів зумовили змінювання вимог до режимів різання і, відповідно, до технічних характеристик обробного обладнання;

3) нові підходи до проектування верстатів, зокрема, модульний принцип з використанням покупних вузлів та можливість реконфігурації, автоматизація верстата;

Наслідок: зниження потреби у традиційному металообробному обладнанні, падіння конкурентоспроможності продукції верстатобудування України як на зовнішньому, так і на внутрішньому ринку через відставання та неможливість забезпечити потрібні параметри працездатності;

4) нестача кваліфікованої робочої сили в умовах збільшення вимог до якості та мінімізації часу виготовлення невеликими партіями складних і навіть унікальних деталей. У ряді випадків це можливо лише з використанням верстатів з ЧПК, при тому не найпростіших, хоч би скільки вони не коштували.

Наслідок: зростання попиту на складніші верстати та засоби автоматизації, тобто зростання вартості;

5) недостатнє фінансування нових виробництв та науково-дослідних робіт;

6) інфляція (за даними МВФ глобальна інфляція у 2022 р. становила 8,8 % і це був найвищий рівень з 1982 р.).

Причин багато як для світу, так і для конкретних країн. Одна з них, наприклад, – епідемія COVIDy. В Україні додалась агресія Росії і наслідком стало збільшення цін на енергоносії, що сприяло збільшенню термінів постачання та цін на верстати незалежно від країни, яка їх постачає.

Висновки. Уся вищенаведена інформація дозволяє впевнитись, що головним чинником відновлення виробництва у галузі стане зростання внутрішнього попиту на вітчизняну продукцію, зокрема на верстати вітчизняного виробництва, тобто імпортозаміщення. Саме результативна політика імпортозаміщення забезпечує зростання незалежності національної економіки загалом та щодо окремих галузей.

Для реалізації цієї умови необхідним є:

- 1) єдина система державного планування й розробки програм діяльності, які базуються, зокрема, на прогнозуванні подальшого стану наявних галузей та напрямків економіки України, з врахуванням наявних ресурсів та можливих термінів виконання планів розвитку;
- 2) аналіз сучасного стану функціонування верстатобудування України;
- 3) визначення специфіки внутрішнього та зовнішнього ринку продукції саме верстатобудування, виявлення її впливу на економіку, зокрема вибір конкретних напрямків підвищення конкурентоздатності;
- 4) маркетингова діяльність на підприємствах верстатобудування та врахування її результатів;
- 5) підтримка малого бізнесу – фінансова державна, організаційно-управлінська, імпортозаміщення, спрощення виводу нової продукції на ринок: обов'язкова умова;
- 6) організація своєчасного отримання комплектуючих, зокрема за допомогою держави, створення державних програм;
- 7) розвиток логістики, організація взаємовідносин із підприємствами;
- 8) взаємодія промислових підприємств із державними науково-технічними, інженерними, дослідно-конструкторськими інститутами, які повинні своєчасно отримувати підтримку держави, а свої розробки узгоджувати із потребами промисловості України;
- 9) сприяння з боку держави виходу з кризи вищої технічної освіти та науки України, реалізація ролі освіти у створенні потужної та незалежної держави.

Оскільки мова йде про конструкції нових сучасних верстатів з ЧПК (відповідно і про системи управління, керовані електродвигуни тощо, тобто не лише механічна частина), переважно про прецизійні багатопозиційні верстати та обробні центри, то багато що залежить від конструктора, але тільки у питанні, що стосується безпосередньо верстата та іншого технологічного обладнання, а це лише частка того, що треба організувати та виконати. Новий підхід до організації підготовки технічних спеціалістів повинен ґрунтуватися на розширенні інформативності та універсальності навчальних програм.

Список використаних джерел

1. Виктор Скаршевский. (23 января 2020). Госстатистика подтверждает: деиндустриализация продолжается. (взято 13 лютого 2025). <https://strana.ua/opinions/246058-hosstatistika-podtverzhaet-deindustrializatsija-prodolzhaetsja.html>.
2. Коваленко, О. К. (2024, 4 квітня). У Держстаті розповіли, що в Україні відбувається з промисловим виробництвом – де найбільший спад. NV Бізнес. <https://biz.nv.ua/ukr/markets/zrostannya-promislovogo-virobnictva-v-ukrajini-v-2023-roci-statistika-i-prognozi-50406983.html>.
3. Собкевич, О. В., Шевченко, А. В., Русан, В. М., Белашов, Є. В., Жураковська, Л. А., & Жаліло, Я. А. (2024). Пріоритети розвитку реального сектора в умовах війни та повоєнного відновлення економіки України. *Національний інститут стратегічних досліджень*. <https://doi.org/10.53679/niss-analytrep.2024.03>.
4. Моїсєєв, В. (2024, 8 лютого). Машинобудування зростає завдяки оборонним замовленням, але нерівномірно та нестійко. *The Page*. <https://thepage.ua/ua/economy/stan-ukrayinskogo-mashinobuduvannya-u-lyutomu-2024-roku>.
5. Моїсєєв, В. (2024а, 6 лютого). Війна зробила попит на вантажні авто рекордним та змінює його структуру. *The Page*. <https://thepage.ua/ua/economy/rinok-vantazhnih-avtomobiliv-u-2023-ta-2024-rokah>.
6. Шмигаль, Д. (2023, 12 жовтня). ВПК, агросектор, ІТ та енергетика – серед ключових секторів, які стануть основою економіки майбутнього. Урядовий портал. <https://www.kmu.gov.ua/news/denys-shmyhal-vpk-ahrosetektor-it-ta-enerhetyka-sered-kliuchovykh-sektoriv-iaki-stanut-osnovoiu-ekonomiky-maibutnoho>.

7. Про затвердження переліку об'єктів державної власності, що мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави, Постанова Кабінету Міністрів України № 83 (2024) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/83-2015-p#Text>.
8. Іщук, С. О. (2022). Розвиток машинобудування в Україні: проблеми та шляхи їх вирішення : монографія. Львів: Інститут регіональних досліджень ім. М. І. Долишнього НАН України. <https://ird.gov.ua/irdp/p20220002.pdf>.
9. «Верстатобудівна та інструментальна промисловість» *referat-ok.com.ua*. (б. д.). *referat-ok.com.ua*» Для тих хто прагне знань! <http://referat-ok.com.ua/work/verstatobudivna-ta-instrumentalna-promislovist>.
10. Про затвердження переліку підприємств, які мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави, Постанова Кабінету Міністрів України № 911 (2000) (Україна). (втрата чинності від 29.08.2000). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/911-97-p#Text>.
11. Про затвердження переліку підприємств, які мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави, Постанова Кабінету Міністрів України № 1734 (2015) (Україна). (втрата чинності від 07.03.2015). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1734-2004-p#Text>.
12. ДП «КТЦ Верстатобудування». Засновник Міністерство Промислової Політики. (26.09.1996). <https://opendatabot.ua/c/00224834>.
13. Каталог компаній України КВЕД 28.41 – Виробництво металообробних машин. <https://catalog.youcontrol.market/mashynobuduvannia/28.41>.
14. 00222166 – ПРАТ ФІРМА БЕВЕРС. (б. д.). Опендатабот. <https://opendatabot.ua/c/00222166>.
15. Бізнес-Гід. ГУЦОЛ ІНДАСТІАЛ ТОВ. <https://gutsol.business-guide.com.ua/products/unit?pid=198732>.
16. Пічик, К. В. (2001). Верстатобудування як фактор розвитку машинобудування та підвищення його потенціалу. *Формування ринкових відносин в Україні*, (12), 152-158.
17. Гнатуш, В. А. (2022). Тренди світового ринку металообробного обладнання. *Оборудование и инструмент для профессионалов Металлообработка*, (1), 108–110. <https://www.informdom.com/metallООbrabotka/2022/1/trendi-svtovogo-rinku-metallООbrobnogo-obladnannya.html>.
18. Жовтобрюх, В. О. (2022). Верстатобудування у світі. Драйвери зростання та вузькі місця. *Оборудование и инструмент для профессионалов. Металлообработка*, (1), 9–13. https://www.informdom.com/uploads/metal/22_2/9_Varius_2022_2.pdf.
19. Про схвалення Стратегії цифрового розвитку інноваційної діяльності України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках, Розпорядження Кабінету Міністрів України № 1351-р (2024) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1351-2024-p#Text>.
20. Могилевская, О. (2009). Современная концепция маркетингового управления предприятиями машиностроения. *Економіка та держава*, (10), 27–29. http://www.economy.in.ua/pdf/10_2009/10.pdf.
21. Про схвалення Концепції розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти), Розпорядження Кабінету Міністрів України № 960-р (2020) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/960-2020-p#Text>.
22. Кузнецов, Ю. (2017). Вызовы четвертой промышленной революции «Индустрия 4.0» перед учеными Украины. *Вісник Херсонського національного університету*, (2(61)), 67-75. https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/issue/view/26/26.
23. Кузнецов, Ю. (2021). Новітні технології в умовах викликів «Індустрія – 4.0 і наближення «Індустрія 5.0». У *Проблеми теорії проектування та виготовлення транспортно-технологічних машин*. https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/35912/2/MNTK_2021_Kuznetsov_Yu_N-Latest_technologies_23-25.pdf.
24. Головна – INDUSTRY4UKRAINE. (б. д.). INDUSTRY4UKRAINE. <https://www.industry4ukraine.net>.
25. Бельський, А. (2016, 7 грудня). Сучасні тенденції створення модульного обладнання та перспективи модернізації наявного верстатного парку. Rexroth Bosh Group. <https://www.tecorp-group.com.ua/sovremennye-tendencii-sozdaniya-modulnogo-oborudovaniya-i-perspektivy-modernizacii-imeyushhegosya-stanochnogo-parka>.

26. Волчкевич, И. Л. (2012). Рациональное использование станков с ЧПУ в условиях многономенклатурного производства. *Машиностроение и компьютерные технологии*, (02), 1. <https://cyberleninka.ru/article/n/ratsionalnoe-ispolzovanie-stankov-s-chpu-v-usloviyah-mnogonomenklaturnogo-proizvodstva>.

27. Кузнєцов, Ю. (2019). Причини руйнації вищої технічної освіти та науки в Україні і шляхи виходу з кризи. *Науково-інформаційний вісник Національної академії наук вищої освіти України*, (1-2), 61-64.

References

1. Skarshevskiy, V. (2020). Gosstatistika podtverzhdayet: deindustrializatsiya prodolzhaetsya. [State Statistics confirms: deindustrialisation continues]. <https://strana.ua/opinions/246058-hosstatistika-podtverzhdaet-deindustrializatsiya-prodolzhaetsja.html>.

2. Kovalenko, O. K. (2024, April 4). U Derzhstati rozpovily, scho v Ukraini vidbuvaet'sia z promvyrobnystvom – de naibil'shyi spad [The State Statistics Service told us what is happening with industrial production in Ukraine - where the biggest decline is]. *NV Biznes – Scientific Journal Business*. <https://biz.nv.ua/rus/markets/zrostantnya-promislovogo-virobnictva-v-ukrajini-v-2023-roci-statistika-i-prognozi-50406983.html>.

3. Sobkevych, O.V., Shevchenko, O.St., Rusan, St.M. et. All. (2024). Priorityty rozvytku real'noho sektoru v umovakh viyny ta povoyennoho vidnovlennya ekonomiky Ukrayiny [Priorities for the development of the real sector in the context of war and post-war economic recovery in Ukraine]. *Natsionalnyi instytut stratehichnykh doslidzhen – National Institute for Strategic Studies*. NISD. <https://doi.org/10.53679/niss-analytrep.2024.03>.

4. Moisyeyev, V. (February 8, 2024). Mashynobuduvannia zrostaie zavdiaky oboronnym zamovlenniam, ale nerivnomirno ta nestiiko [The machine building industry is growing thanks to defence orders, but unevenly and unsteadily]. *The Page*. <https://thepage.ua/ua/economy/stan-ukrayinskogo-mashynobuduvannya-u-lyutomu-2024-roku>.

5. Moisyeyev, V. (February 6, 2024). Viina zrobyla popyt na vantazhni avto rekordnym ta zminiui yoho strukturu [The war has driven demand for trucks to a record high and is changing its structure]. *The Page*. <https://thepage.ua/ua/economy/rinok-vantazhni-avtomobiliv-u-2023-ta-2024-rokah>.

6. Shmihal, D. (October 12, 2023). VPK, ahrosektor, IT ta enerhetyka – sered klyuchovykh sektoriv, yaki stanut osnovoyu ekonomiky maybutnoho [The military-industrial complex, agriculture, IT and energy are among the key sectors that will form the basis of the economy of the future]. *Uriadovyi portal - Government portal*. <https://www.kmu.gov.ua/news/denys-shmyhal-vpk-ahrosektor-it-ta-enerhetyka-sered-kliuchovykh-sektoriv-iaki-stanut-osnovoiu-ekonomiky-maibutnoho>.

7. Pro zatverdzhennya pereliku obektiv derzhavnoyi vlasnosti, shcho mayut stratehichne znachennya dlia ekonomiky ta bezpeky derzhavy [On Approval of the List of State-Owned Property Objects of Strategic Importance for the Economy and Security of the State], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 83 (2024) (Ukraine). https://ips.ligazakon.net/document/kp150083?an=17&ed=2024_02_16.

8. Ishchuk, S.O. (Red.). (2022). *Rozvytok mashynobuduvannya v Ukrayini: problemy ta shlyakhy yikh vyrishennya [Development of machine building in Ukraine: problems and ways of their solution]*. DU “Instytut rehionalnykh doslidzhen imeni M.I. Dolishnoho NAN Ukrayiny”. <https://ird.gov.ua/irdp/p20220002.pdf>.

9. “Verstatobudivna ta instrumentalna promyslovist”. [Machinery and tooling industry]. *Dlia tykh khto prahne znan! – For those who seek knowledge!* <http://referat-ok.com.ua/work/verstatobudivna-ta-instrumentalna-promyslovist>.

10. Pro zatverdzhennya pereliku pidpriemstv, yaki maiut' stratehichne znachennya dlia ekonomiky i bezpeky derzhavy [On Approval of the List of Enterprises of Strategic Importance for the Economy and Security of the State], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 911 (dated 21 August 1997) (Ukraine). (invalid since 29.08.2000). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/911-97-rr#Text>.

11. Pro zatverdzhennya pereliku pidpriemstv, yaki maiut' stratehichne znachennya dlia ekonomiky i bezpeky derzhavy [On approval of the list of enterprises of strategic importance for the economy and security of the state], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1734 (2015) (Ukraine) (invalid since 29.08.2000). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1734-2004-%D0%BF#Text>.

12. Derzhavne pidpriemstvo «KTTs Verstatobuduvannia». Zasnovnyk Ministerstva Promyslovoyi Polityky [State Enterprise 'KTC Machine Tool Building'. Founder of the Ministry of Industrial Policy]. (26.09.1996). <https://opendatabot.ua/c/00224834>.

13. Kataloh kompaniy Ukrayiny KVED 28.41 – Vyrobnystvo metaloobrobnykh mashyn [Catalogue of companies of Ukraine KVED 28.41 - Manufacture of metalworking machines]. <https://catalog.youcontrol.market/mashynobuduvannia/28.41>.

14. PRAT Firma BEVERS– [BEVERS Private Joint-Stock company]. <https://opendatabot.ua/c/00222166>.

15. Biznes-hid. HUTSOL INDUSTRIAL TOV [Business-Guide: GUTSOL INDUSTRIAL LLC]. <https://gutsol.business-guide.com.ua/products/unit?pid=198732>.

16. Pichyk, K.V. (2022). Verstatobuduvannya yak faktor rozvytku mashynobuduvannya ta pidvyshchennya yoho potentsialu [Machine tool building as a factor in the development of machine building and increasing its potential]. *Formuvannya rynkovykh vidnosyn v Ukraini – Formation of market relations in Ukraine*, (12), 152-158.

17. Hnatysh, V.A. (2022). Trendy svitovoho rynku metaloobrobnoho obladdnannya [Trends in the global metalworking equipment market]. *Obladdnannya ta instrument dlia profesionaliv. Metalobrobka – Equipment and tools for professionals. Metal treatment*, (1), 108-110. <https://www.informdom.com/metalloobrabotka/2022/1/trendi-svitovoho-rynku-metalloobrobnoho-obladdnannya.html>.

18. Zhovtobryukh, V.O. (2022). Verstatobuduvannya u sviti. Drayvery zrostannya ta vuz'ki mistysya. [Machine tool industry in the world. Growth drivers and bottlenecks]. *Obladdnannya ta instrument dlia profesionaliv. Metalobrobka – Equipment and tools for professionals – Metal treatment*, (1), 9-13. <https://www.informdom.com/metalloobrabotka/2022/2/verstatobuduvannya-u-svit-draiveri-zrostannya-ta-vuzk-mscya.html>.

19. Pro skhvalennia Stratehii tsyfrovoho rozvytku innovatsiinoi diial'nosti Ukrainy na period do 2030 roku ta zatverdzhennia operatsiinoho planu zakhodiv z yii realizatsii u 2025-2027 rokakh [On Approval of the Strategy for Digital Development of Innovation Activities of Ukraine for the Period up to 2030 and Approval of the Operational Action Plan for its Implementation in 2025-2027], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1351-p (2024) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1351-2024-%D1%80#Text>.

20. Mohylevska, O.Yu. (2009). Sovremennaia kontseptsyia marketynhovoho upravleniia predpriiatyamy mashynostroeniia [Modern concept of marketing management of machine-building enterprises]. *Ekonomika ta derzhava – Economy and state*, (10), 27–29. <http://www.economy.in.ua/?n=10&y=2009>.

21. Pro skhvalennia Kontseptsii rozvytku pryrodnycho-matematychnoi osvity (STEM-osvity) [On Approval of the Concept for the Development of Science and Mathematics Education (STEM Education)], Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 960-r (2020) (Ukraine). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/960-2020-%D1%80#n8>.

22. Kuznyetsov, Yu.M. (2017). Vyklyky chetvertoyi promyslovoyi revolyutsii "Industriia 4.0" pered vchenymy Ukrainy [Challenges of the fourth industrial revolution "Industry 4.0" for scientists of Ukraine]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of Kherson National University*, (2(61)), 67-75. [https://kntu.net.ua/rus/content/download/82016/475528/file/%D0%92%D1%96%D1%81%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%E2%84%962\(61\).pdf](https://kntu.net.ua/rus/content/download/82016/475528/file/%D0%92%D1%96%D1%81%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%E2%84%962(61).pdf).

23. Kuznyetsov, Yu. (2021). Novitni tekhnolohii v umovakh vyklykiv «Industriia 4.0» i nablyzhennia «Industriia 5.0» [Novitni tekhnolohii v umovakh vyklykiv «Industriia 4.0» i nablyzhennia «Industriia 5.0»]. *U Problemy teorii proektuvannia ta vyhotovlennia transportno-tekhnolohichnykh mashyn – In Problems of the theory of design and manufacture of transport and technological machines*. https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/35912/2/MNTK_2021_Kuznetsov_Yu_N-Latest_technologies_23-25.pdf.

24. Main – *INDUSTRY4UKRAINE*. *INDUSTRY4UKRAINE*.

25. Bielskyi, A. (2016, December 7). Suchasni tendentsii stvorennia modul'noho obladdnannya ta perspektyvy modernizatsii naiavnogo verstatnoho parku [Modern trends in the creation of modular equipment and prospects for modernising the existing machine tool fleet]. Rexroth Bosh Group. <https://www.tecorp-group.com.ua/sovremennye-tendencii-sozdaniya-modulno-oborudovaniya-i-perspektivy-modernizatsii-imeyushhegosya-stanochnogo-parka>.

26. Volchkevych, I.L. (2012). Ratsional'noe yspolzovanie stankov s ChPU v uslovyakh mnohonomenklaturnoho proyzvodstva [Rational use of CNC machines in conditions of multinomial production]. *Mashynostroenye y komp'yuternyye tekhnolohyy – Mechanical Engineering and Computer Science*, 1(02). <http://technomag.edu.ru>.

27. Kuznyetsov, Yu.M. (2019). Prychyny ruynatsii vyschoi tekhnichnoi osvity ta nauky v Ukraini i shliakhy vykhodu z kryzy [Reasons for the destruction of higher technical education and science in Ukraine and ways out of the crisis]. *Naukovo-informatsiyni visnyk Natsional'noi akademii nauk vyschoi osvity Ukrainy – Scientific and Information Bulletin of the National Academy of Sciences of Higher Education of Ukraine*, (1-2), 61-64.

Отримано 19.02.2025

UDC 338.45:621

Irina Verba¹, Oleksandr Danylenko²

¹ PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: verba.dan@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1891-7215>. ResearcherID: ABM-1532-2022

² PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: alednlnk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1587-9225>. ResearcherID: ABN-8993-2022

RESTORATION OF MACGHINE TOOL PRODUCTION AS A PREREQUISITE FOR INDUSTRY DEVELOPMENT IN UKRAINE

This review article presents the analysis of the state of mechanical engineering and machine tool production in Ukraine based on publications and research available from open information sources. The key limitations to the development of these sectors have been identified.

The production output of machine tool plants determines the level of mechanical engineering and ensures Ukraine's industrial independence. In the context of martial law, it also supports defense capabilities, which underscores relevance of understanding current state of machine tool building and challenges that need competent and timely solutions. Evaluations and forecasts by market analysts do not always unambiguously reflect actual situation. In the article, the primary causes of the decline of domestic machine tool manufacturing and the demand for its products, which continue to be produced, albeit to a limited extent are identified.

Certain directions for necessary changes have been analysed in accordance with Ukraine's Digital Development and Innovation Strategy for the period up to 2030, along with the Approved Operational Action Plan for its implementation.

The key outcome of restoring machine tool manufacturing in Ukraine will be the growth of domestic demand for locally produced machine tools, i.e., import substitution. The article outlines some necessary actions to implement import substitution, particularly those related to scientific, technical, and engineering personnel and their interaction. It also provides a preliminary overview of actions that could influence the current situation, primarily in terms of approaches to the modernization and upgrading of CNC machines that are already in use or are still being produced in Ukraine. Despite not being state-of-the-art machining equipment, these machines remain in demand on the domestic market due to their reliability and cost-effectiveness.

In the article, necessity of marketing activities at both existing and newly established machine tool plants, creation of state-supported logistics programs to ensure the timely delivery of components, and provision of support for small businesses operating in the sector is also highlighted.

Keywords: machine tool building, development strategy, import substitution, machine tool marketing, technical education crisis, CNC machine modernization, CNC machine components, small business in machine tool building.

Fig.: 1. References: 27

**Олексій Дмитрович Кагляк¹, Олексій Козирєв²,
Юрій Валентинович Ключников³, Катерина Левко⁴,
Олександр Савченко⁵, Олена Мельник⁶**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: kaglyak.olexa@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5602-543X>

²старший викладач кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: akozyrev@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5385-8578>

³кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: yu.klyuchnikov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1970-6340>

⁴студентка кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: k.levko-ml91@lil.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-4933-0912>

⁵аспірант кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: o.savchenko-ltft24@lil.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-5586-5667>

⁶кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: melnik.olena@lil.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8667-4262>

ФОРМУВАННЯ ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛАЗЕРНОГО ЦИКЛІЧНОГО ОПРОМІНЮВАННЯ

У статті представлені результати моделювання теплових процесів під час лазерного формоутворення листових матеріалів. Моделювання проводилося у спеціально розробленому програмному забезпеченні, що базується на трьохмірному нестационарному рівнянні теплопровідності. Представлений аналіз перетворень у вуглецевих сталях під час формівних циклів лазерного опромінення. Приведені результати металографічних досліджень оброблених зразків зі сталі 65Г, де підтверджене протікання мартенситного перетворення. Показана залежність величини деформації від кількості циклів лазерного опромінення та порівняння формування зразків без попередньої термічної обробки та підданих об'ємному гартуванню.

Ключові слова: лазерне формоутворення; залишкові напруження; лазерне опромінення; листовий матеріал.

Рис.: 17. **Табл.:** 1. **Бібл.:** 9.

Актуальність теми дослідження. Формоутворення листових матеріалів класичними технологіями потребує використання металоємного високовартісного штампового обладнання. Крім того, під час формування крихких, пружних чи попередньо зміцнених матеріалів, виникає багато проблем, пов'язаних з утворенням холодних тріщин (рис. 1, а), наявністю зворотного пружного ефекту, обмеженістю величини деформації. Натомість, лазерне формоутворення листових матеріалів є процесом, що не потребує силової дії на матеріал, не потребує високовартісного інструменту, може швидко переналаштовуватися та може мати зворотний зв'язок у процесі обробки, що дозволяє розробляти адаптивні методики обробки та проводити обробку згаданих пружних крихких матеріалів та матеріалів із підвищеною жорсткістю. З огляду на це є необхідність проведення досліджень лазерного формоутворення листових пружних та попередньо зміцнених матеріалів.

Постановка проблеми. Для вибору режимів лазерного формоутворення (ЛФ) листових матеріалів, особливо тих, в яких під час нагрівання-охолодження відбуваються поліморфні перетворення, необхідне розуміння рівня величин температур у матеріалі під час обробки та їх розподіл. Також важливим є розуміння швидкостей нагрівання та охолодження, оскільки вони безпосередньо впливають на структурно-фазові перетворення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Лазерне формоутворення за рахунок своїх переваг, зокрема, гнучкості [1; 2] швидкій переналаштовуваності, легкій автоматизації [3], знаходить все ширше застосування. Особливістю ЛФ листових матеріалів, порівняно з

процесами формування обробкою тиском, є те що ЛФ здійснюється без силового впливу інструменту на матеріал. Формування відбувається за рахунок створення в матеріалі внутрішніх напружень, під час швидкісного локального лазерного нагрівання та охолодження. Коли рівень внутрішніх напружень перевищує межу текучості матеріалу, вони компенсуються за рахунок пластичної деформації. При повторному опроміненні величина деформації зростає і можливо досягти кутів згинання 90° (рис. 1, б) та більше. Дослідники [4; 5; 6] виокремлюють такі механізми ЛФ: механізм градієнта температур, механізм випинання, механізм зсідання та механізм поліморфних перетворень. У роботах [7; 8] дослідники вивчали питання структурно-фазових перетворень у сталях та композитних матеріалах під час ЛФ та можливість моделювання цих процесів, використовуючи скінченно-елементні моделі. Однак у цих роботах не висвітлено питання формоутворення попередньо-зміцнених матеріалів. Найбільш поширеним є використання режимів формування, які забезпечують дію механізму градієнту температур [6; 7; 8]. Проте при обробці вуглецевих сталей буде діяти також механізм поліморфних перетворень. Причому оскільки мартенситне перетворення викликає локальне збільшення об'єму матеріалу на етапі охолодження [7], коли найбільшу формувальну силу має механізм градієнта температур, то ці процеси будуть конкурувати між собою та протидіяти один одному. Загалом, ЛФ має достатньо високу повторюваність [9], але для кращого передбачення та моделювання результатів формоутворення існує необхідність більш глибокого дослідження впливу поліморфних перетворень на процес лазерного формоутворення та дослідження можливість формоутворення попередньо зміцнених матеріалів.

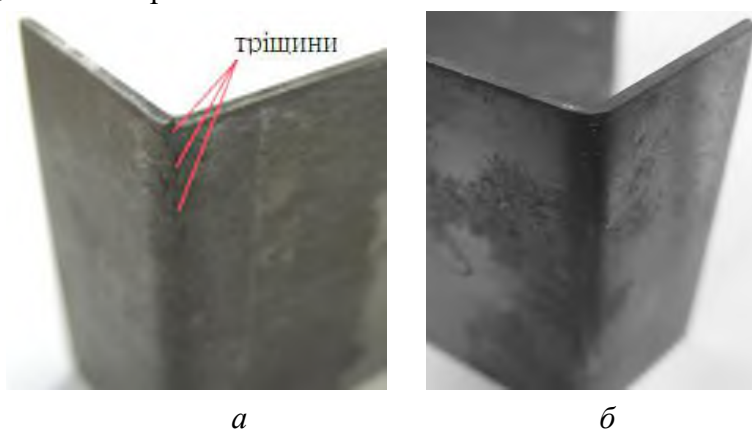


Рис. 1. Зразки зі сталі 65Г сформовані обробкою тиском (а) та лазерним формоутворенням (б)

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Вироби з листових металів можуть експлуатуватися в різних умовах, зокрема в умовах осьових чи знакозмінних навантажень, в умовах абразивної дії, чи дії агресивних середовищ. З огляду на зазначене потрібно проводити термічну обробку для підвищення експлуатаційних властивостей. Проведення термічної обробки в сформованому стані спричинятиме деформування вже готових виробів та спотворення їхньої геометрії. Формування попередньо-зміцнених виробів класичними способами несе ризики тріщиноутворення (рис. 1, а). Подібні ризики присутні і при формуванні твердих пружних матеріалів та матеріалів із підвищеною жорсткістю. Натомість, лазерне формоутворення дозволяє формувати згадані матеріали без утворення тріщин (рис. 1, б). Отже, необхідно провести дослідження лазерного формоутворення попередньо-гартованих вуглецевих листових матеріалів.

Метою статті є дослідження лазерного формоутворення попередньо-гартованих вуглецевих листових матеріалів для виявлення особливостей впливу ефекту накопичення тепла на структуру матеріалу в умовах багаторазових циклів обробки.

Виклад основного матеріалу. З метою прогнозування розподілу температур в зоні обробки та швидкості нагрівання та охолодження і, як наслідок, вибору режиму обробки, було розроблене спеціальне програмне забезпечення. Програмне забезпечення розроблювалося в середовищі візуального програмування Delphi, з використанням OpenGL для відображення графічної інформації та Express Bars Suite для розробки інтерфейсу головного вікна програми.

Зразок представлявся у вигляді пластини з геометричними розмірами L_x , L_y , L_z , на верхній поверхні зразка розташовувалося рухоме джерело тепла – лазерний промінь, рух якого характеризується швидкістю $V(t)$ та напрямком Oy (рис. 2).

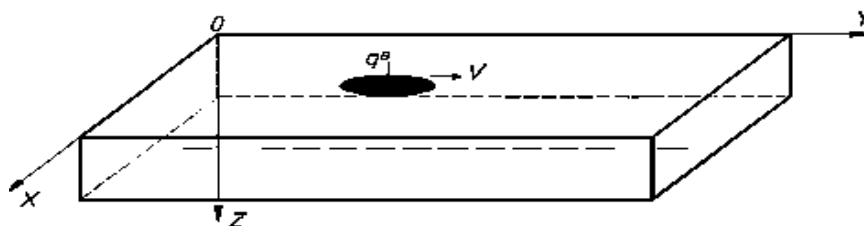


Рис. 2. Розрахункова схема процесу лазерного формоутворення

Поверхня зразка перебувала у процесі теплообміну з навколишнім середовищем, температура якого U_c . Розподіл потужності лазера описується своїм законом $W(x, y, t)$, а його дія викликає на поверхнях обробки тепловий потік із розподілами щільності $q^s(x, y, t)$.

Теплові процеси та розподіл температур у зразку описується тривимірним нестационарним рівнянням теплопровідності:

$$c\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right), x \in [0, L_x], y \in [0, L_y], z \in [0, L_z], t \in [0, T_k],$$

c – питома теплоємність;

ρ – густина матеріалу зразка;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

$U(x, y, z, t)$ – температура матеріалу в точці з координатами (x, y, z) в момент часу t .

Початкова умова: $U(x, y, z, 0) = U_c$.

Крайові умови в зоні дії лазерного випромінювання мають такий вигляд:

на верхній поверхні

$$\lambda \frac{\partial U(x, y, 0, t)}{\partial z} + q^s(x, y, t) = 0.$$

на нижній поверхні

$$\lambda \frac{\partial U(x, y, L_z, t)}{\partial z} - q^h(x, y, t) = 0.$$

На інших ділянках розрахункової області крайові умови моделюють теплообмін із навколишнім середовищем за законом Ньютона:

$$\pm \lambda \frac{\partial U}{\partial n} = -\alpha(U - U_c).$$

Результати моделювання. При обробці вуглецевих сталей, слід враховувати, що критичні температури A_{c1} та A_{c3} при лазерному нагріванні значно вищі за аналогічні при пічному нагріванні. Важливим є те, що перегрівання α – фази до температури вищої 9100°C приводить до зміни дифузійного механізму перетворення фериту в безвуглецевий аустеніт, з подальшим розчиненням у ньому цементиту, на бездифузійний. Усі перераховані фазові перетворення проходять зі зміною питомої ваги і дають свою складову в тимчасові напруження, що виникають на стадії нагрівання. Залежно від різниці в питомій вазі вихідних та кінцевих фаз ця складова може реалізовувати в зоні термічного впливу

(ЗТВ) напруження стиснення або розтягу. Тимчасові термічні напруження, що обумовлені механізмом градієнту температур, на етапі нагрівання завжди мають від'ємний знак, а їхній максимальний рівень розташовується в зоні максимальних градієнтів температур. Для аналізу процесів, що відбуваються на різних ділянках ЗТВ, при опроміненні зразка променем з круглим перерізом, розраховувалася зміна температури в різних точках ЗТВ протягом термічного циклу (рис. 3). Розрахунок проводився за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення, яке базується на трьохмірному нестационарному рівнянні теплопровідності з відповідними крайовими умовами.

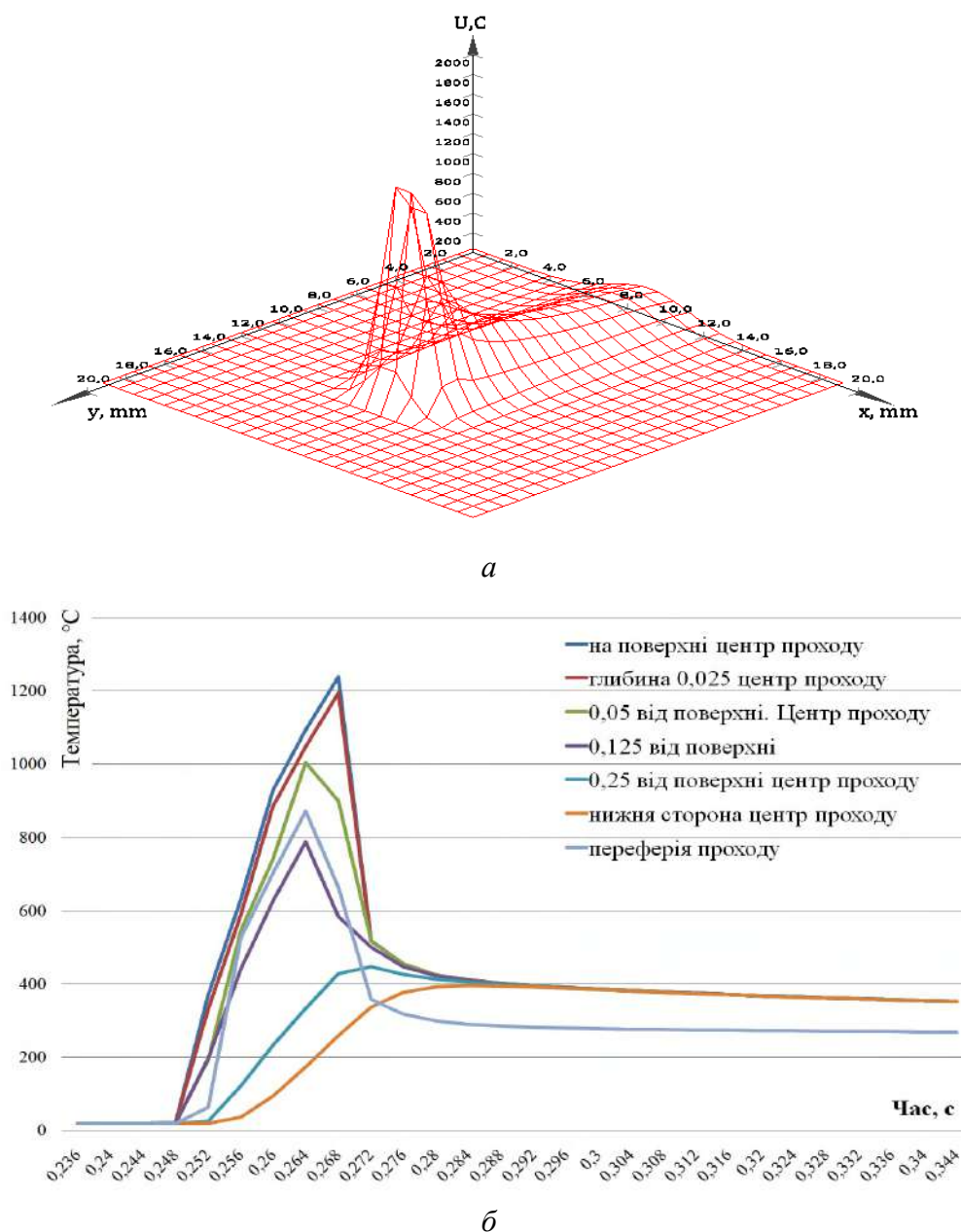


Рис. 3. Результати моделювання:

a – об'ємний розподіл температур у зоні обробки, *б* – зміна температури в різних точках ЗТВ протягом термічного циклу при опроміненні променем круглого перерізу (ІАГ – лазером при $P = 0,5 \text{ кВт}$, $v = 3 \text{ м/хв}$, $d = 3 \text{ мм}$)

Якщо отримані температури нагрівання співставити з температурами перлітного перетворення (A_{c1}) та повного розчинення фериту (A_{c3}), для досліджуваних сталей (зокрема, марганцевиста сталь 65Г), то стає очевидним, що фазові перетворення в сталі при нагріванні зменшують термічні напруження, які виникають при дії найпоширенішого механізму лазерного формування – механізму градієнту температур (МГТ). При співпадінні за часом моменту досягнення максимального градієнта температур та температури A_{c3} результуюча величина тимчасових напружень може бути меншою за границю текучості сплаву, що виключить механізм формоутворення.

Враховуючи аналіз розподілу температур, слід зазначити, що зона максимальних напружень стискання, що виникають по механізму градієнта температур збігається з віссю променя, а також, що при визначенні внеску фазових та структурних перетворень у тимчасові напруження, треба враховувати перетворення перліту в аустеніт, яке згідно з дилатометричними дослідженнями проходить зі зменшенням питомої ваги сплаву.

Оскільки коефіцієнт термічного розширення аустеніту значно більший за аналогічний параметр ферито-перлітної структури тієї ж сталі, слід вважати, що максимум термічних напружень стискання припадає на діапазон температур $A_{c3} \dots T_{\max}$. Враховуючи, що границя текучості аустеніту зменшується з ростом температури, можна стверджувати, що саме на цьому етапі в ЗТВ проходить пластична деформація з релаксацією напружень до рівня границі пружності.

Під час охолодження відбувається згинання зразка, тобто формоутворення проходить саме на цій стадії термічного циклу. Згинання проходить при дії моменту сил, що мають протилежне направлення. Тобто спрощена епюра тимчасових напружень у зразку до початку згинання повинна мати вигляд (рис. 4).

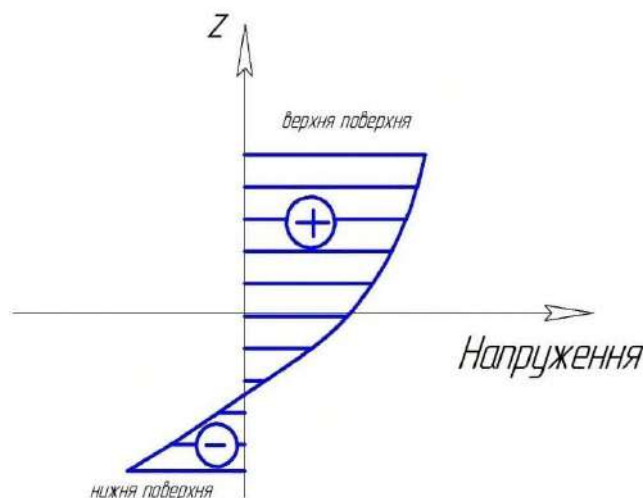


Рис. 4. Вигляд епюри тимчасових напружень у перерізі zy

Розглянемо механізми, що можуть формувати подібну епюру.

1. Механізм градієнту температур спрацьовує у зворотному щодо фази нагрівання напрямку. А саме – інтенсивне тепловідведення з області ЗТВ, у якій на етапі нагрівання пройшла пластична деформація, в «холодну» зону, повинно зменшувати її об'єм. Протидія непрогрітих шарів цьому процесу викличе появу в них від'ємних, а у вказаний області, напружень розтягу. Тобто сформується епюра подібна до зображених на рис. 4.

2. Фазові перетворення. На цій стадії термічного циклу повинні проходити згідно з термодинамічною діаграмою розпаду переохолодженого аустеніту.

Аналіз подібних залежностей для точок ЗТВ, температура яких перевищала 870°C , показує, що такі об'єми переохолоджувалися до температури мартенситного перетворення не перетинаючи область дифузійного розпаду переохолодженого аустеніту. Тобто ці об'єми повинні складатися з мартенситу та залишкового аустеніту.

Методика проведення експериментальних досліджень. Відповідно до вищенаведеного, необхідно дослідити зміни, які відбуваються зі структурою та властивостями матеріалів, які піддаються багаторазовому циклічному термічному впливу під час лазерного формоутворення. Для цього зразки розміром $100 \times 50 \times 2$ мм зі сталі 65Г закріплювалися консольно (рис. 5) паралельно один одному в струбчині та опромінювалися лазерним випромінюванням довжиною хвилі 1.06 мкм за однакового режиму (потужність 2 кВт , швидкість 5 м/хв , діаметр фокусування 6 мм). Зразки покривалися графітом для вирівнювання показника поглинання лазерного випромінювання.



Рис. 5. Закріплення зразків та їх позиціонування під обробку

Оброблялися дванадцять пар зразків, які опромінювалися від одного до дванадцяти разів, після чого проводилося дослідження величини деформації та порівняння структури в зразках з різною кількістю опромінь.

Після лазерної обробки, за допомогою електроерозійного різання дротовим електродом, виконувався розріз поперек осі лазерного проходу, після чого виготовлялися мікрошліфи та проводилося дослідження мікроструктури та розподілу мікротвердості в перерізі лазерного проходу в двох взаємоперпендикулярних напрямках (рис. 6).

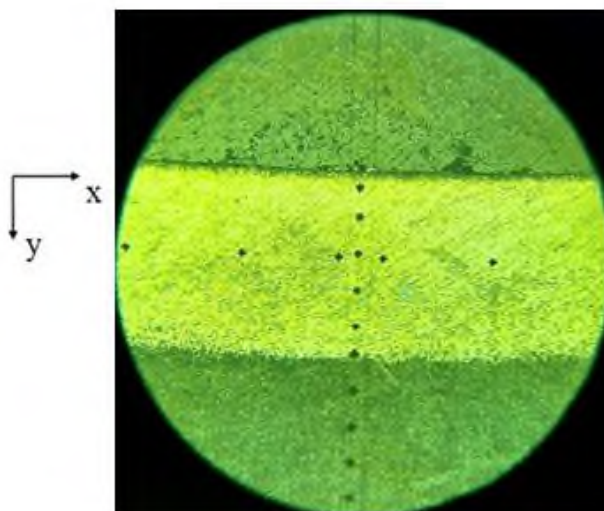


Рис. 6. Дослідження розподілу мікротвердості в поперечному перерізі лазерного проходу

Результати експериментальних досліджень. Результати вимірювання величини деформації, яка виражалася через кут згинання пластини, демонструють, що як гартовані, так і негартовані зразки сталі деформуються в напрямку на зустріч лазерному променю, величина деформації збільшується зі збільшенням кількості проходів. Слід зазначити, що попередньо гартовані зразки демонструють більший кут деформації порівняно з негартованими.

При аналізі результатів після 12 проходів лазерного променя було встановлено, що різниця у деформації між гартованими та негартованими зразками становить $4^{\circ}18'$. Середня різниця між гартованими та негартованими зразками становить 40,02 %. Жодних ознак плавлення, тріщин або інших дефектів не виявлено, що свідчить про ефективність лазерного формоутворення для обробки обох типів сталі. Результати вимірювань величини деформації (кута згинання) зразків представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати формоутворення

№ проходу	Гартована	Не гартована	Різниця між зразками
1	$1^{\circ}20'$	$0^{\circ}50'$	37,5
2	$2^{\circ}30'$	$1,38^{\circ}$	44,8
3	3°	2°	33,33
4	$3^{\circ}46'$	$2^{\circ}06'$	44,23
5	$4^{\circ}80'$	$2^{\circ}26'$	54,38
6	$5^{\circ}30'$	$3^{\circ}36'$	34,54
7	$6^{\circ}40'$	$3^{\circ}56'$	41
8	$7^{\circ}10'$	$4^{\circ}40'$	34,84
9	$8^{\circ}18'$	$5^{\circ}18'$	36,14
10	$9^{\circ}50'$	6°	38,96
11	$11^{\circ}30'$	$6^{\circ}48'$	40,87
12	$12^{\circ}28'$	$8^{\circ}10'$	34,5

Вихідні значення мікротвердості на зразках, що не піддавалися лазерному впливу показані на рис. 7 для попередньо гартованого зразка та рис. 8 для незагартованого зразка. Гартований зразок має достатньо високу твердість на рівні 973,4 HV, з максимальним значенням 1158,2 HV та мінімальним 809,9 HV.

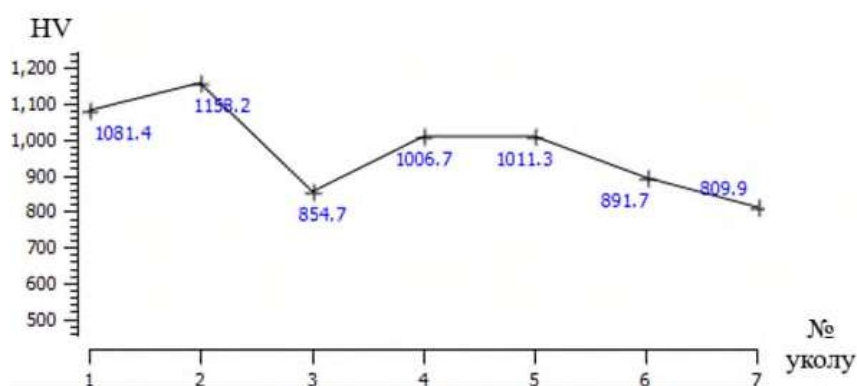


Рис. 7. Розподіл мікротвердості (напрямок x) на зразку гартованої сталі, який не піддавався лазерному опроміненню

Негартована сталь, яка не піддавалася лазерній обробці, має значення твердості, що відповідають твердості матеріалу у стані постачання та становить близько 233 одиниці HV.

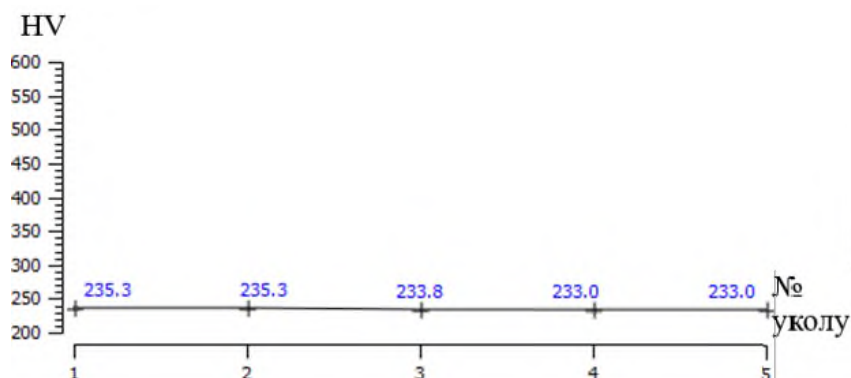


Рис. 8. Розподіл мікротвердості (напрямок x) на зразку не гартованої сталі, який не піддавався лазерному опроміненню

Після здійснення першого лазерного проходу, характер розподілу мікротвердості в зоні лазерного проходу набуває наступного вигляду: в центральній частині проходу спостерігається плато високих значень мікротвердості на рівні 870 HV, на периферії проходу спостерігається зона відпуску з мінімальним значенням 485 HV, і подальшим підйомом до вихідного значення (рис. 9).

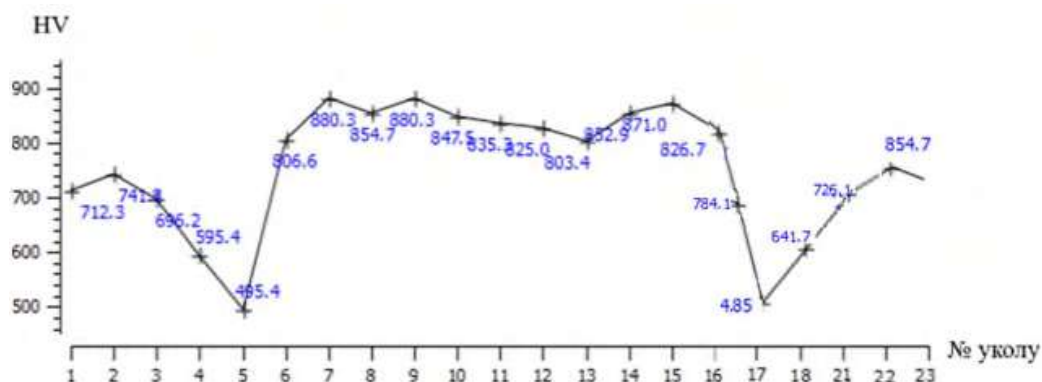


Рис. 9. Розподіл мікротвердості (напрямок x) на зразку гартованої сталі, який піддавався 1 лазерному опроміненню

Слід зазначити, що мінімальні значення мікротвердості вдвічі вищі ніж твердість матеріалу без термічної обробки. У вертикальному перерізі (рис. 10) подібна картина: пікове значення твердості поблизу поверхні, витримка в межах однорідної зони гартування, після якої спостерігається зона відпуску. За зоною відпуску значення мікротвердості підвищуються, однак в середньому є на 200 одиниць HV нижчими за початкову твердість.

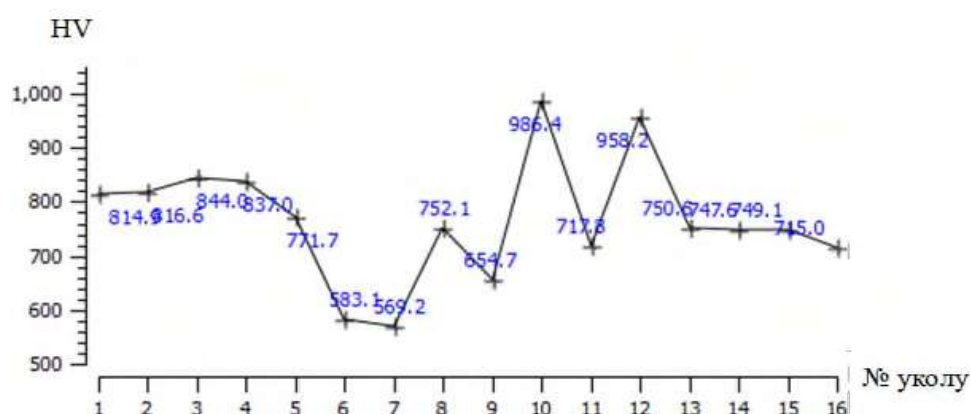


Рис. 10. Розподіл мікротвердості (напрямок y) на зразку гартованої сталі, який піддавався 1 лазерному опроміненню

У випадку негатованого зразка (рис. 11), розподіл мікротвердості також мав плато з високою мікротвердістю (середнє значення 820 HV), що розмірами відповідало ширині лазерного проходу. Однак середнє значення мікротвердості на цьому плато було на 50 одиниць HV нижче, ніж у випадку попередньо гатованого зразка. За межами плато спостерігається достатньо різке зниження мікротвердості до значень що відповідають мікротвердості основного матеріалу. Загалом така картина характерна для умов поверхневого лазерного зміцнення.

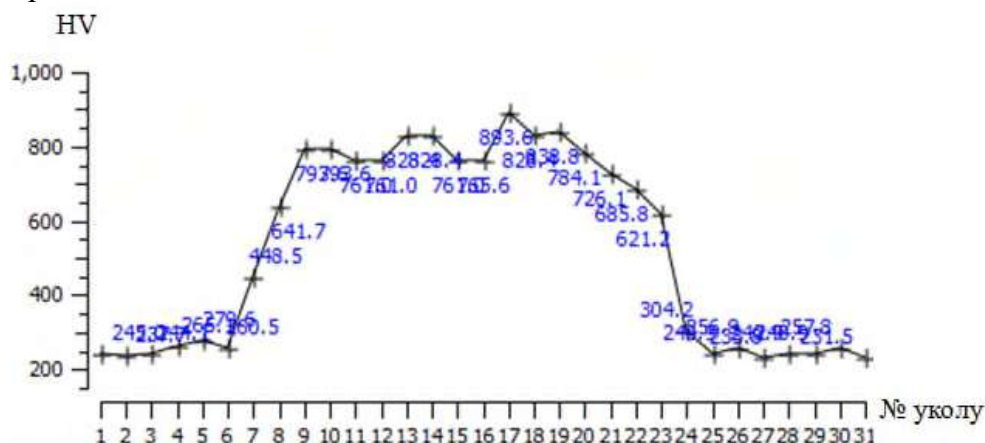


Рис. 11. Розподіл мікротвердості (напрямок x) на зразку не гатованої сталі, який піддавався лазерному опроміненню

Розподіл мікротвердості у вертикальному напрямку можна охарактеризувати максимальними значеннями біля поверхні, у зоні лазерного проходу, де вони досягають 884 HV, зниженням у перехідній зоні до значень вихідного матеріалу (рис. 12).

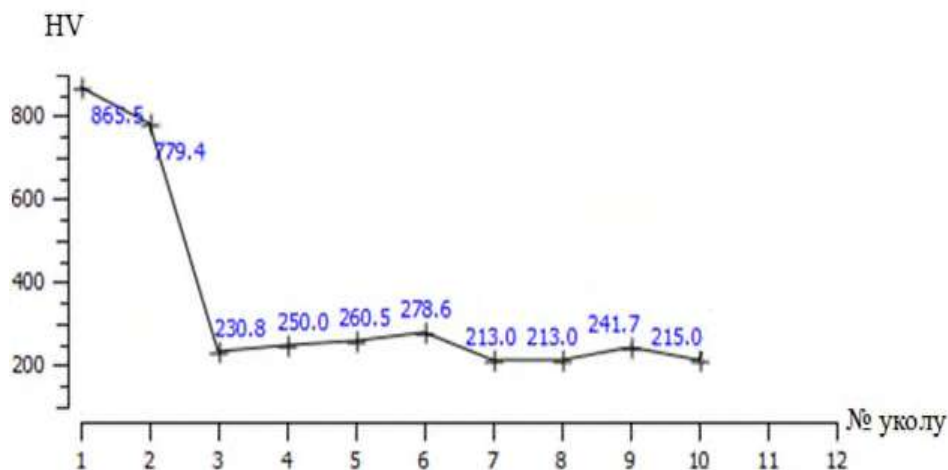


Рис. 12. Розподіл мікротвердості (напрямок y) на зразку не гатованої сталі який піддавався лазерному опроміненню.

Після одиничного проходу й у випадку попередньо гатованої сталі, і у випадку негатованої, структура є характерною для поверхневого лазерного зміцнення, спостерігається зона лазерної обробки (світла зона), вузька перехідна зона та структура вихідного матеріалу (рис. 13).



Рис. 13. Мікроструктура області лазерного проходу, збільшення $\times 100$ після одного лазерного опромінення

Зі збільшенням кількості проходів, спостерігається розширення перехідної зони на обох типах зразків (рис. 14 та 15).

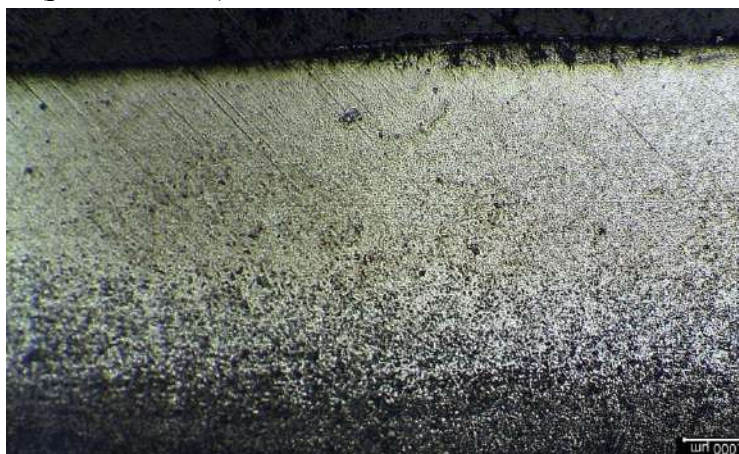


Рис. 14. Мікроструктура області лазерного проходу, збільшення $\times 100$ після шести проходів лазерного опромінення, попередньо гартований зразок Сталь 65Г



Рис. 15. Мікроструктура перехідної зони, збільшення $\times 200$ після шести проходів лазерного опромінення, попередньо гартований зразок Сталь 65Г

Через збільшення перехідної зони значення розподілу мікротвердості також змінюються, звужується ширина плато з високими значеннями твердості, стають пологішими схили до максимальних значень мікротвердості (рис. 16 та 17).

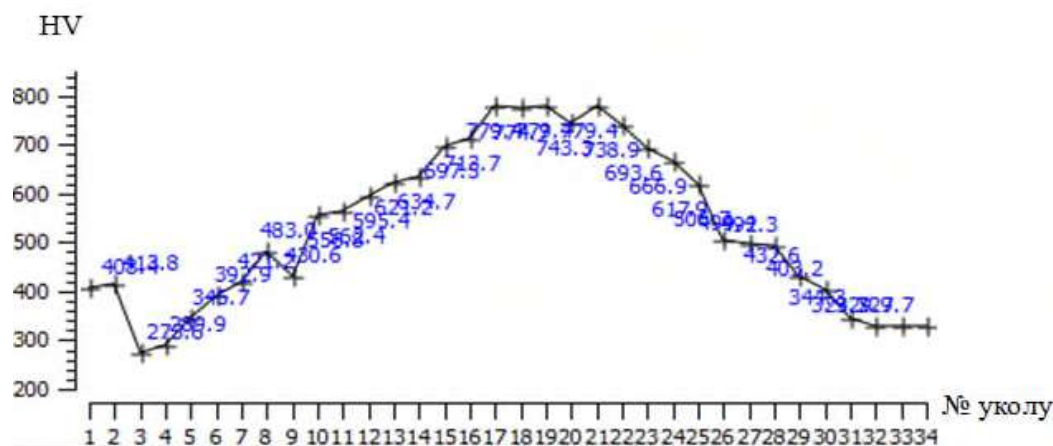


Рис. 16. Розподіл мікротвердості (напрямок x) на зразку гартованої сталі, який піддавався 12 лазерним опроміненням

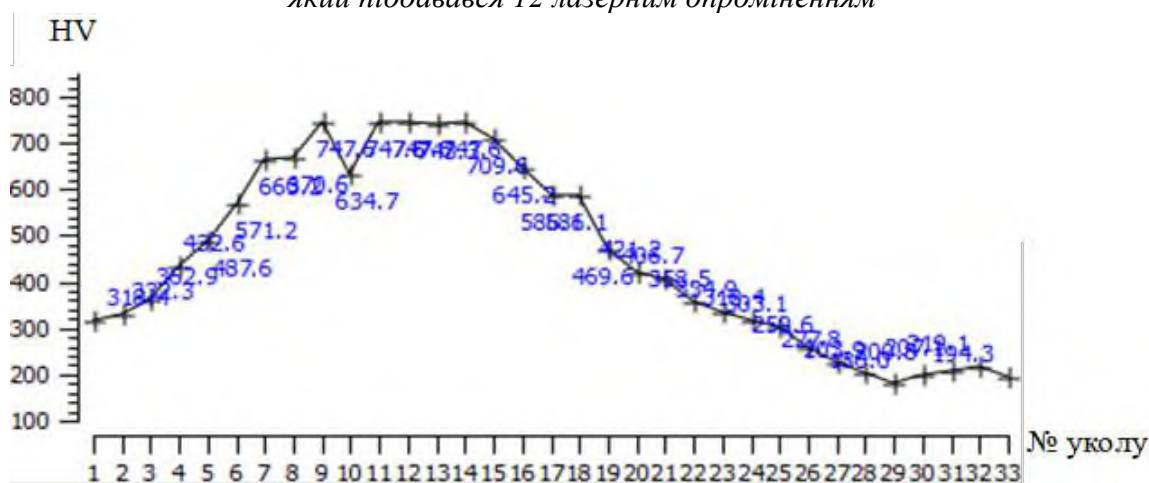


Рис. 17. Розподіл мікротвердості (напрямок x) на зразку не гартованої сталі, який піддавався 12 лазерним опроміненням

Слід зазначити, що після дев'яти циклів опромінення на поверхні зразків обох типів спостерігалось поверхневе оплавлення.

Загалом оплавлення є небажаним явищем під час лазерного формоутворення. Воно є наслідком накопичення тепла, оскільки зразок не встигає охолонути до початкової температури за час між циклами. Це накопичення тепла також є причиною розширення перехідної зони при збільшенні кількості лазерних проходів. Отже, слід посилювати тепловідведення від зони обробки за рахунок додаткового охолодження.

Висновки.

1. Моделювання дозволяє визначати розподіл температур та швидкості нагрівання в зоні обробки та обирати режими формування для досягнення бажаного результату.
2. Встановлено, що величина кута згинання попередньо гартованих зразків була суттєво (близько 40 %) вищою порівняно зі зразками без попереднього об'ємного гартування.
3. При збільшенні кількості лазерних проходів збільшується величина деформації, але також зростає рівень залишкової температури, яка, після 9 циклів, призводить до поверхневого оплавлення зразків.
4. Зростання залишкової температури призводить до зростання розмірів ЗТВ, втрати однорідності структури в ній та зниженню максимальної твердості на 100 HV.
5. Для стабілізації процесу формування та уникнення небажаних явищ поверхневого оплавлення рекомендується використовувати додаткові засоби охолодження.

Список використаних джерел

1. Thomsen, A. N., Kristiansen, M., Kristiansen, E., & Endelt, B. (2020). Online measurement of the surface during laser forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(3-4), 1569–1579. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04950-6>.
2. Zhang, X., Niu, W., Zhang, Y., Hu, X., Fang, J., Zuo, L., Yin, Y., & Shah, S. S. A. (2021). Investigation of large area sheet forming with laser shocking spot by spot. *Materials & Design*, 212, 110279. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110279>.
3. Abazari, H. D., Seyedkashi, S. M. H., Gollo, M. H., & Moon, Y. H. (2017). Evolution of microstructure and mechanical properties of SUS430/C11000/SUS430 composites during the laser-forming process. *Metals and Materials International*, 23(5), 865–876. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-7053-6>.
4. Vollertsen, F. (1996) Models for Laser Forming Process. *Laser Assisted Net Shape Engineering. Proceedings of the LANE'96. 1*, 324-335.
5. Magee, J., Watkins, K. G., & Steen, W. M. (1998). Advances in laser forming. *Journal of Laser Applications*, 10(6), 235–246. <https://doi.org/10.2351/1.521859>.
6. Bachmann, A. L., Dickey, M. D., & Lazarus, N. (2020). Making light work of metal bending: Laser forming in rapid prototyping. *Quantum Beam Science*, 4(4), 44. <https://doi.org/10.3390/qubs4040044>.
7. Cheng, J., & Yao, Y. L. (2002). Microstructure integrated modeling of multiscan laser forming. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124(2), 379–388. <https://doi.org/10.1115/1.1459088>.
8. Abazari, H. D., Seyedkashi, S. M. H., Gollo, M. H., & Moon, Y. H. (2017b). Evolution of microstructure and mechanical properties of SUS430/C11000/SUS430 composites during the laser-forming process. *Metals and Materials International*, 23(5), 865–876. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-7053-6>.
9. Kaglyak, O., Romanov, B., Romanova, K., Myrgorod, O., Ruban, A., & Shvedun, V. (2021). Repeatability of sheet material formation results and interchangeability of processing modes at multi-pass laser formation. *Materials Science Forum*, 1038, 15–24. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1038.15>.

References

1. Thomsen, A. N., Kristiansen, M., Kristiansen, E., & Endelt, B. (2020). Online measurement of the surface during laser forming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(3-4), 1569–1579. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04950-6>.
2. Zhang, X., Niu, W., Zhang, Y., Hu, X., Fang, J., Zuo, L., Yin, Y., & Shah, S. S. A. (2021). Investigation of large area sheet forming with laser shocking spot by spot. *Materials & Design*, 212, 110279. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110279>.
3. Abazari, H. D., Seyedkashi, S. M. H., Gollo, M. H., & Moon, Y. H. (2017). Evolution of microstructure and mechanical properties of SUS430/C11000/SUS430 composites during the laser-forming process. *Metals and Materials International*, 23(5), 865–876. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-7053-6>.
4. Vollertsen, F. (1996) Models for Laser Forming Process. *Laser Assisted Net Shape Engineering. Proceedings of the LANE'96. 1*, 324-335.
5. Magee, J., Watkins, K. G., & Steen, W. M. (1998). Advances in laser forming. *Journal of Laser Applications*, 10(6), 235–246. <https://doi.org/10.2351/1.521859>.
6. Bachmann, A. L., Dickey, M. D., & Lazarus, N. (2020). Making light work of metal bending: Laser forming in rapid prototyping. *Quantum Beam Science*, 4(4), 44. <https://doi.org/10.3390/qubs4040044>.
7. Cheng, J., & Yao, Y. L. (2002). Microstructure integrated modeling of multiscan laser forming. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 124(2), 379–388. <https://doi.org/10.1115/1.1459088>.
8. Abazari, H. D., Seyedkashi, S. M. H., Gollo, M. H., & Moon, Y. H. (2017b). Evolution of microstructure and mechanical properties of SUS430/C11000/SUS430 composites during the laser-forming process. *Metals and Materials International*, 23(5), 865–876. <https://doi.org/10.1007/s12540-017-7053-6>.
9. Kaglyak, O., Romanov, B., Romanova, K., Myrgorod, O., Ruban, A., & Shvedun, V. (2021). Repeatability of sheet material formation results and interchangeability of processing modes at multi-pass laser formation. *Materials Science Forum*, 1038, 15–24. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1038.15>.

Отримано 19.04.2025

**Oleksii Kaglyak¹, Oleksii Kozyrev², Yuriy Klychnykov³, Kateryna Levko⁴,
Oleksandr Savchenko⁵, Olena Melnyk⁶**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: kaglyak.olexa@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5602-543X>

²Lecturer of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: akozzyrev@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5385-8578>

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: yu.klychnykov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1970-6340>

⁴Student of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: k.levko-ml91@lil.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-4933-0912>

⁵post-graduate student of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: o.savchenko-ltft24@lil.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-5586-5667>

⁶PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: melnyk.olexa@lil.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8667-4262>

**LASER FORMING OF CARBON STEEL SHEETS
BY Cycled LASER IRRADIATION**

Laser forming (LF) of sheet material is a progressive treatment process and have some benefits. Laser forming is a flexible process and needs no heavy metal-intensive equipment and tools. Materials with high rigidity, brittle, elastic materials can be treated by laser forming. Therefore, the investigation of LF is important task. An important point to study is repeatability of multipass laser forming of sheet materials and exploring of possibilities of stabilizing process parameters. Actually, this research is aimed at these issues.

Results of heat process modeling during laser forming are shown. The modeling was carried out in specially developed software based on the three-dimensional non-stationary equation of heat conductivity. The analysis of transformations in carbon steels during forming cycles of laser irradiation is presented. The results of metallographic investigation of processed samples of steel 65G are presented, where occurrence of martensitic transformation is confirmed. Dependence of the deformation magnitude on the number of laser irradiation cycles and a comparison of the forming of samples without prior heat treatment and subjected to bulk hardening are shown. It is noted that collected heat during multi pass laser treatment causes expand heat affected zone decrease homogeneity of it and decrease maximal level of micro hardness on 100 HV. It is mentioned that previously hardened samples (by volume hardening) have higher level of bending angle compare to samples without previous heat treatment. Difference between mentioned options was more than 40% after twelve passes. It was recommended to use external cooling source to decrease level of collected heat in case of multipass laser forming process. High level of collected heat could initiate surface melting of treated samples.

Keywords: laser forming; residual stresses; laser treatment; sheet material.

Fig.: 17. Table: 1. References.: 9.

**Микола Віталійович Шаповал¹, Вадим Григорович Михайлик²,
Анатолій Ігорович Криворот³**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)
E-mail: nvshapoval75@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6943-7687>

²аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)
E-mail: v.mikhajlik1988@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-2435-8592>

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)
E-mail: anatoliikryvorot@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5919-7352>

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ГІДРОПРИВОДНОГО РОЗЧИНОНАСОСА З РІЗНИМИ КОМБІНОВАНИМИ КОМПЕНСАТОРАМИ

Аналіз сучасних насосів вказує на пошук шляхів спрощення їхніх конструкцій і на вдосконалення принципової схеми однопоршневих розчинонасосів при зведенні до мінімуму пульсацій у трубопроводі під час транспортування будівельних розчинів. З метою зниження пульсації в сучасних однопоршневих розчинонасосах застосовують компенсатори тиску у вигляді повітряних ковпаків різного об'єму. Але повітряні компенсатори, поряд з перевагами, мають суттєві недоліки: стиснуте повітря безпосередньо контактує з перекачуваним розчином та інтенсивно видаляється із ковпака в процесі роботи розчинонасоса. Особливо прискорюється видалення повітря при підвищеному тиску (вище за 1,2...1,5 МПа). При цьому ефективність роботи компенсатора суттєво знижується, а пульсації зростають. Виникає необхідність у створенні однопоршневих розчинонасосів підвищеної надійності завдяки використанню гідравлічного привода, який нівелює поперечні зусилля на циліндро-поршневу групу, та зменшить рівень пульсацій тиску і подачі розчину, забезпечить плавність регулювання подачі під час роботи, також повинні зрости показники продуктивності і об'ємного ККД щодо електромеханічного привода. Тому розробка та впровадження гідравлічних приводів разом із комбінованим компенсатором забезпечить ефективну роботу розчинонасосів під час перекачування будівельних розчинів та легких бетонів.

Ключові слова: розчинонасос; комбінований компенсатор; ступінь пульсацій тиску; замкнена камера; будівельний розчин.

Рис.: 5. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Розчинонасоси призначені для транспортування гумовотканинними або металевими трубопроводами будівельних розчинів різного складу і призначення з подальшим механізованим нанесенням їх на поверхні, які підлягають обробці. Нанесення може здійснюватися через повітряний пістолет або за допомогою безкомпресорного сопла.

Серед будівельних розчинів, які транспортуються розчинонасосами, виділяють вапняно-піщані штукатурні розчини різної рухомості, цементно-піщані розчини для стяжок наливних підлог, розчини на основі крейди та інші.

Для перекачування будівельних розчинів переважно застосовують насоси об'ємної дії. Принцип роботи таких насосів базується на періодичній зміні об'єму їхньої робочої камери, який збільшується під час усмоктування суміші та зменшується під час її нагнітання в трубовід.

Перехід від ручного нанесення розчинів на механізоване, що активно впроваджується, дозволяє суттєво збільшити змінний виробіток на одного штукатура. Сучасна технологія передбачає використання для нанесення розчинів на оброблювані поверхні різноманітних за конструкцією форсунок та насадок, які встановлюються на кінці напірного рукава. Галузі застосування розчинонасосів постійно розширюються. Значний економічний ефект досягається при використанні розчинонасосів для подачі й укладання цементно-піщаних розчинів при влаштуванні наливної стяжки підлог, заповнення під тиском щільними розчинами швів та з'єднань між залізобетонними конструкціями, а також для подачі оздоблювальних розчинів на великих будівельних об'єктах.

При виборі вібраційної плити для конкретного завдання варто враховувати тип матеріалу, що ущільнюється, та особливості робочого майданчика, де проводитимуться роботи. Це забезпечить оптимальну продуктивність та якість виконаної роботи.

Постановка проблеми. Використання розчинонасосів для транспортування малорухомих будівельних розчинів до робочих місць та механізованого їх нанесення на поверхні стін висуває до їх конструкції ряд специфічних вимог.

Це, перш за все, здатність розчинонасоса забезпечувати рівномірну подачу будівельних розчинів різної консистенції по трубопроводах. Перекачування розчинонасосами розчинів рухомістю понад 10 см за осадкою стандартного конуса не викликає значних проблем. Проте сучасні методи проведення штукатурних робіт вимагають використання розчинів рухомістю 9...10 см, а рухомість цементно-піщаних розчинів, які транспортуються трубопроводами, ще менша – 7...8 см. Стабільна подача таких розчинів можлива лише за наявності насоса з високою всмоктувальною здатністю і відсутністю в ньому конструктивних умов, що сприяють "зависанню" клапанів.

Першочерговою вимогою є рівномірність подачі штукатурного розчину. Найбільш поширені однопоршневі розчинонасоси односторонньої дії, які характеризуються значною пульсацією подачі. Ця особливість становить значну проблему для реалізації механізованого соплування до отримання штукатурного шару потрібної товщини, адже для нормальної роботи повітряної форсунки і, особливо, безкомпресорного сопла необхідна стабільна подача розчину. В іншому випадку струмінь штукатурного розчину стає нестабільним, цілеспрямоване нанесення розчину на оброблювану поверхню ускладнюється, а втрати розчину істотно зростають. Варто також відзначити, що при сталому русі розчину опір його протіканню у трубопроводі в 1,5 раза менший, ніж у разі пульсації швидкості потоку, що сприятливо впливає на енерговитрати насоса.

З огляду на вищевказане, сучасні розчинонасоси повинні мати високий коефіцієнт корисної дії (ККД), оскільки втрати розчину, що відбуваються через елементи клапанних і ущільнюючих вузлів, негативно впливають на рівномірність подачі розчину під час роботи розчинонасоса. До того ж вони призводять до суттєвих перевитрат електроенергії, обумовлених зниженням подачі розчину.

Аналіз останніх джерел досліджень. Розчинонасос має широкий спектр використання, зокрема: при виконанні торкрет-робіт під час нанесення загальних і спеціальних рідких сумішей, для перекачування, подачі як спеціально підготовлених, так і готових попередньо змішаних сумішей в складних умовах; а також для ін'єкцій з можливістю регулювання тиску.

Putzmeister P13 [13] – це надійна штукатурна установка, яка обладнана поршневим розчинонасосом із подвійною дією та призначена для приготування та подачі штукатурних сумішей, що містять вапно, пісок, цемент та інші наповнювачі, з використанням інтенсивного циклу змішування. Навіть при значних навантаженнях на цей поршневий насос його деталі практично не піддаються зношуванню, що зумовлено їхньою високою надійністю та якістю.

Розчинонасоси фірми Turbosol [8] мають автоматичний пристрій захисту від надмірного тиску, пристрій рециркуляції, пневматичне дистанційне управління (пуск/зупинка).

Залежно від модифікації розчинонасоси комплектуються: ES стандартно електродвигуном 5,5 кВт/ EMF, електродвигуном зі змішувачем 1,5 кВт, 180 л/ DS дизелем, 10,5 кВт стандарт/ DMF дизелем зі змішувачем примусової дії. Крім того, агрегати оснащені: приводом насоса 2-швидкісною МКП; запобіжним пристроєм від надмірного тиску; рамним двоколісним візком; вібраційним відсіювачем з ситом 8 мм; системою рециркуляції розчину; вбудованим повітряним компресором 270 л/хв з можливістю дистанційного управління.

Серед недоліків розчинонасосів Turbosol варто виділити підвищені ступені пульсацій тиску, що виникають через одинарну дію роботи, невисокий рівень об'ємного ККД, підвищену металоємність.

Насоси з гідравлічним приводом ще не набули значної популярності на вітчизняному ринку, проте в багатьох країнах світу, наприклад, у США, Німеччині, Італії, Норвегії та інших країнах вони здобули широке визнання завдяки своїм перевагам, знайшовши застосування в багатьох галузях промисловості. На сьогодні виробництвом гідравлічних насосів займаються численні компанії з розвинених країн, серед яких Milton Roy (США), Alemite (США), Feluwa Pumpen GMBH (Німеччина), Maritime Hydraulics (Норвегія), Wagner, Dellmeco, FlowMaster, Graco, Tapflo, Wilden Pump & Engineering, Grundfos, Maxroy (США) тощо [9; 10; 11; 12]. Ці насоси знайшли широке застосування в різноманітних галузях промисловості, наприклад, для відкачування в'язких, корозійно-активних і забруднених середовищ із резервуарів і відстійників, ліквідації розливів нафтопродуктів, перекачування бурового розчину та будівельних сумішей, а також як насоси-дозатори в різних технологічних процесах харчової, хімічної та інших галузях промисловості.

Аналіз наукових досліджень показує, що сучасні насоси постають досконалими високотехнологічними агрегатами, які вражають своїми показниками та забезпечують високу ефективність перекачування різноманітних сумішей. Проте насоси не є універсальними, їх розроблено для перекачування певного переліку сумішей. Зважаючи на це, проблема універсальності насосів залишається актуальною, а тому необхідно брати до уваги численні фактори для вирішення поставлених завдань.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У процесі дослідження насосних агрегатів визначається важлива проблема: ступінь пульсації тиску та подачі під час перекачування будівельних розчинів. Ця проблема набуває особливої актуальності при аналізі розчинонасосів одинарної дії. Вивчення нових конструкцій компенсаторів може значно знизити рівень пульсацій тиску та подачі. Головний вектор дослідження спрямований на поглиблене вивчення взаємодії складових елементів компенсаційних пристроїв розчинонасоса з будівельними розчинами різної рухомості.

Мета статті. Провести дослідження та аналіз конструктивних особливостей однопоршневого розчинонасоса, акцентуючи увагу на застосуванні гідравлічного привода та нових компенсуючих пристроїв, які повинні підвищити ефективність його роботи.

Виклад основного матеріалу. Пропонується конструкція гідроприводного розчинонасоса одинарної дії з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму (рис. 1), який містить: гідравлічну частину, яка складається з патрубків всмоктувального 1, який поєднано зі всмоктувальною камерою 3, усередині якої розміщено спеціальну циліндричну вставку, що має зрізану частину сегментної форми, дотична хорда якої під кутом 45° до горизонталі, та нагнітального 12, кулькові клапани всмоктувальний 2 та нагнітальний підпружинений 4, робочий циліндр 6 з поршнем і повзуном, який промивається у штоковій порожнині охолоджувально-змащувальною рідиною під час руху (мильно-масляно-водною емульсією). Гідропривод розчинонасоса оснащено гідроциліндром 8 з поршнем і штоком, який має порожнину з внутрішнім буртиком. Поршень гідроциліндра 8 установлений опозитно (горизонтально) щодо поршня і розділяє гідроциліндр на поршневу та штокову порожнини. Золотниковий розподільник 9 розташований у правій крайній порожнині гідроциліндра й містить два двопояскові диференціальні золотники – основний і керування. Золотник керування установлений співвісно з поршнем гідроциліндра і містить хвостовик. З'єднання штока робочого поршня зі штоком гідравлічного поршня здійснюється за допомогою спеціального хомута 7. Штокова порожнина гідроциліндра 8 постійно з'єднана з лінією напору, а поршнева порожнина через основний золотник

почергово з'єднується з лініями напору або зливу, за рахунок чого й забезпечується зворотно-поступальний рух поршня 6 зі штоком. Золотник керування надійно утримується в одному з робочих положень протягом усього ходу поршня 6 за рахунок високого або низького тиску масла в поршневій порожнині (яка з'єднується з лінією напору або зливу), а поблизу від мертвих точок переводиться внутрішнім буртиком через хвостовик у чергове робоче положення. Стабільність швидкості зворотно-поступального ходу поршня забезпечується тим, що площа поршня гідроциліндра є вдвічі більшою щодо площі перетину штока. Подача гідравлічної рідини по магістралях відбувається за допомогою шестеренного гідравлічного насоса 15 від електродвигуна 11.

Комбінований повітряний компенсатор тиску складається з двох камер: циліндричної, яка з'єднана з нагнітальною камерою, і замкненої, яка являє собою еластичний гумотканинний шланг, який закріплено до штуцера вузла підкачки повітря і встановлено по периметру циліндричної камери на спеціальних обмежувачах. У замкнену камеру встановлено ніпель для закачування повітря під тиском 0,5...0,7 МПа за допомогою компресора. По центру циліндричної камери на направляючому стрижні встановлено поплавко-обмежувач, який розділяє стиснене повітря з розчином і тим самим забезпечує мінімальне видалення повітря з циліндричної камери.

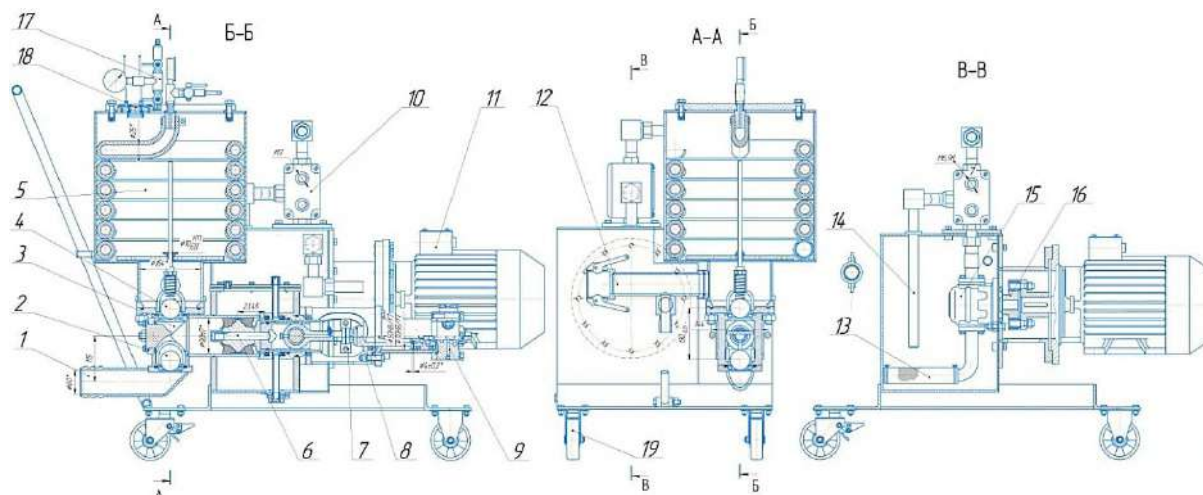


Рис. 1. Конструктивна схема однопоршневого гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму:

- 1, 12 – усмоктувальний та нагнітальний патрубок; 2, 4 – всмоктувальний та нагнітальний підпружинений кульові клапани; 3 – усмоктувальна камера;
 5 – комбінований компенсатор; 6 – поршень з направляючим плунжером;
 7 – хомут гідравлічний привідний циліндр з розподільником; 8 – гідроциліндр з поршнем і штоком; 9 – золотниковий розподільник; 10 – регулятор подачі гідравлічної рідини;
 11 – електродвигун; 13 – фільтр мастильної рідини; 14 – патрубок скидання гідравлічної рідини; 15 – шестерневий гідравлічний насос; 16 – муфта втулково-пальцева; 17 – редуктор підкачки повітря; 18 – скляне віконце з підсвічуванням;
 19 – коліщата пересування

Для збільшення приведенного компенсаційного об'єму компенсатора у верхній кришці передбачено редуктор підкачки повітря 17 у циліндричну камеру з манометром контролю тиску до тиску в замкненій камері компенсатора. Також у циліндричній камері у верхній кришці встановлено скляне віконце з підсвічуванням 18 для огляду та візуального контролю об'єму повітря в циліндричній камері.

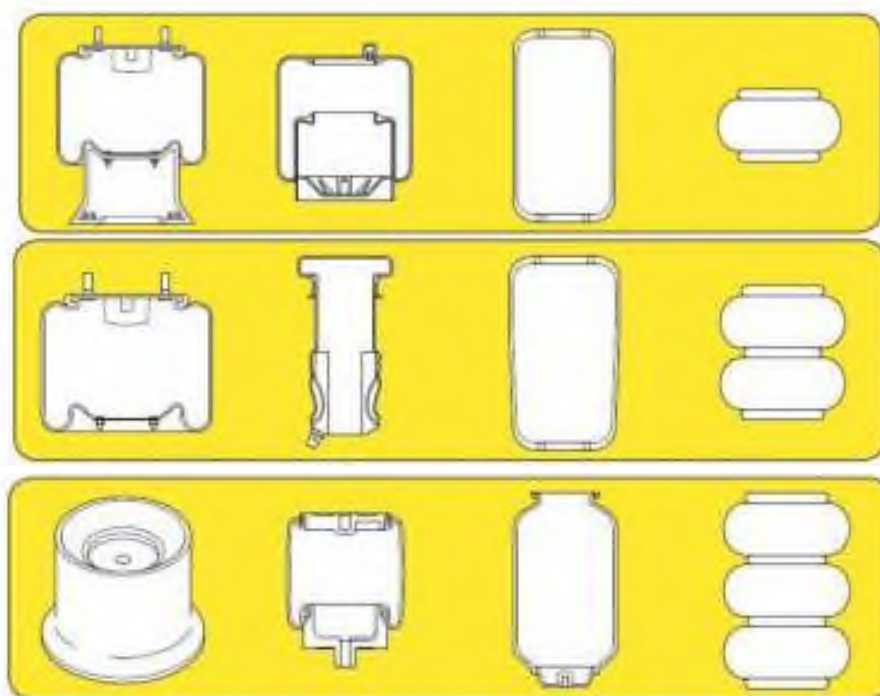


Рис. 2. Форми пневмобалонів для автомобілів

З огляду на необхідність зниження пульсацій та підвищення надійності роботи розчинонасоса, що розглядається вище, рекомендуються до впровадження нові конструкції елементів компенсуючих пристроїв, а саме замкненої камери (рис. 2, 3, 4). Аналіз роботи розчинонасоса з використанням кожного із запропонованих компенсаторів надасть змогу визначити оптимальну конструкцію. Застосування нових конструкцій замкнених камер дозволить усунути недоліки існуючих конструкцій компенсаторів, які використовуються у розчинонасосах одинарної дії для транспортування будівельних розчинів. Пропонуються комбіновані компенсатори закритого типу з використанням автомобільних пневматичних балонів різних модифікацій, вибір яких зумовлений об'ємом та формою вільної камери.

Втім, на початку слід розглянути конструктивні особливості пневмобаланів, які можливо використати в ролі замкненої камери.

Пневмобалон здатний витримувати чималі навантаження, завдяки застосуванню при його виготовленні високоякісного каучуку. Його конструкція складається зі склеєних між собою двох частин. Подібні пневматичні балони знайшли застосування в задній частині підвіски, виключно в автомобілях, де передбачено роздільне розташування пружини та амортизатора (така схема реалізована на більшості сучасних авто).

З функціонального погляду, пневмобалон забезпечує підтримку кузова автомобіля у визначеному положенні відносно дорожнього покриття, регулюючи тиск повітря всередині свого об'єму. Основними компонентами пневматичної системи є компресор, який подає стиснене повітря, та ресивер, який виконує роль резервуара для його зберігання. Пневмобалон виконує роль пружного елемента, беручи на себе ударні навантаження та вібрації.

Очевидно, що у конструкції автомобіля пневмобалон функціонує інакше, ніж як замкнена камера компенсатора при перекачуванні абразивних вологих середовищ. Щоб впоратися з цим, потрібно обрати кілька пневмобалонів, котрі могли б результативно зменшити пульсації тиску розчину та забезпечити тривалий термін служби.



Рис. 3. Пневмобалони:

а – пневморессора 3B-300 для вантажних НУД; б – пневмобалони (пневмопідушки) гофровані ATC Air Suspension Products (Пневмобалон задній лівий Audi A7 Sportback (2011-2018)); в – пневмопідушка задня ліва MATOMI 48090-35011; г – пневморессора зі стаканом (пластик) (виробництво Sampra) SP 554156-KP; д – пневмобалон (пневмопідушка) для автомобіля Mercedes-Benz, моделі E Class, серії W212 виробництва польської компанії Limak є якісним недорогим аналогом оригінальних пневмобалонів; е – пневмопідушка (балон) Mercedes 975N, W010950437 320x81.2x140 (975N) (Contech | 97500)

Отже, набуває актуальності вивчення роботи пневматичних балонів, як замкненої камери в конструкціях комбінованих компенсаторів з різними геометричними параметрами. Варто підкреслити, що ефективність роботи компенсатора напряму пов'язана з ефективним спрацюванням замкненої камери у вигляді пневмобалона, а саме здатністю деформуватися та демпфірувати при зростанні тиску й пульсацій подачі розчинної суміші.

Розглянемо конструктивні особливості пневмобалонів (рис. 2). Пневмобалони (пневморессори) використовують як значно ефективнішу альтернативу порівняно з металевими пружними елементами – пружинами і торсіонами. Конструктивно пневматична підвіска автомобіля складається з герметичного балона або рукава, виготовленого зі спеціальної армованої гуми. Усередині цього балона міститься повітря. Принцип роботи пневмобалона базується на тому, що, тиснувши вагою автомобіля та вантажу зверху, стиснене повітря відповідає зворотною дією, величина якого визначає несучу здатність пневмобалона. Цей показник залежить від об'єму повітря, яке закачане у пневмобалон, та внутрішнього тиску. Коли пневмобалон стискається під впливом ваги автомобіля, він прагне повернутися до вихідного стану, відновлюючи первісний тиск. Водночас опір повітря зростає зі збільшенням впливу навантаження. Така особливість пневмобалона дозволяє уникнути пробою гумової оболонки.

Попри елементарність принципу функціонування та порівняно просту конструкцію, пневморесори є досить комплексним компонентом. Під час експлуатації пневматична підвіска безперервно піддається значним статичним і динамічним навантаженням. До того ж місце розташування пневмобалонів спричиняє постійний вплив пилу, дорожнього бруду та волог.

Представлені пневмоподушки виготовлено зі зносостійких матеріалів, стійких до різних погодних умов. Конструкції пневмобалонів показано на рис. 3. Переважно це балони циліндричної форми, виготовлені з еластомерів на основі каучуку з армуванням переважно синтетичними нитками. Також трапляються пневмобалони грушоподібної секційної конструкції (рис. 3, *а*) та у вигляді гофр (сильфонів) (рис. 3, *б*, *в*).

Пневмобалони (пневмоподушки) від ATC Air Suspension Products являють собою повноцінну заміну заводських автозапчастин, забезпечуючи водієві комфорт та тривалий термін служби. Вироби вирізняються безпечністю, точністю та високими стандартами якості. Кожна пневмоподушка комплектується відбійником, ущільнювальним кільцем круглого перерізу, верхнім кріпленням, клапаном для підтримки залишкового тиску та монтажним болтом.

Продукція ATC Air Suspension виготовляється з еластомірних матеріалів високої якості, основу яких складає каучук. Кільця пневморесор фіксуються за допомогою спеціальної технології, що гарантує надійність роботи та герметичність з'єднань.

Нижче детально проаналізуємо конструкції пневмобалонів, представлених на рис. 4.

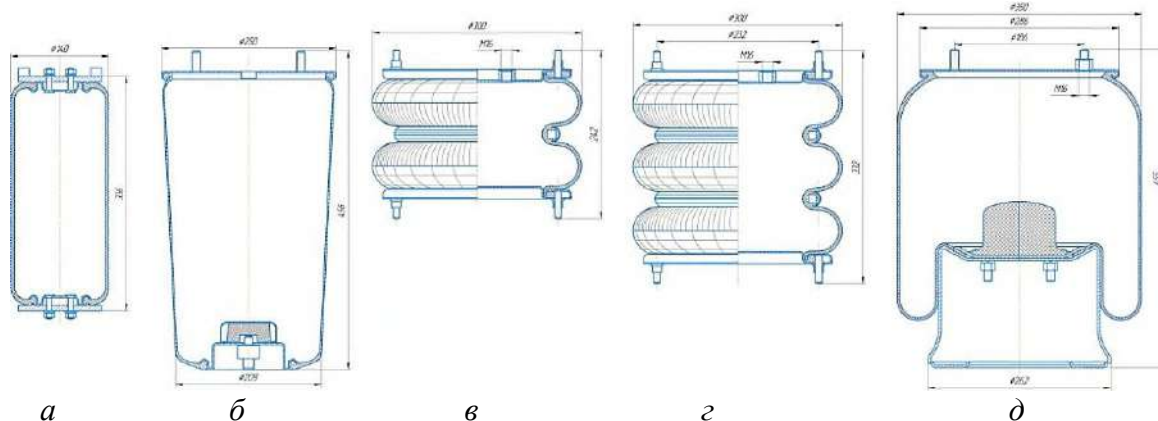


Рис. 4. Пневмобалони, що використовувались для дослідження у компенсаторах розчинонасоса

Як видно із зображень рис. 4, конструктивні відмінності пневмобалонів визначають загальну схему їх використання у вигляді замкненої камери компенсаторів. Відповідно, їх спрацювання в компенсаторі також буде відбуватися по різному. Наприклад, пневмобалон на рис. 4, *а*, стискатиметься, коли тиск подачі у системі перевищує тиск у самому балоні, розходячись переважно радіально, перпендикулярно до поздовжньої осі, та лише частково паралельно їй. Подібний принцип зміни об'єму повітря пневмобалону спостерігатиметься і в конструкціях пневмобалонів, представлених на рис. 4 *б*, *д*. Натомість, у пневмобалонах (рис. 4 *в*, *г*) зменшення об'єму в умовах підвищеного тиску буде супроводжуватися вираженими деформаціями паралельно вісі. Проте, картина роботи пневмобалона може змінитися, якщо тиск робочого розчину буде рівномірним по всій висоті пневмобалона.

Чим зумовлено рішення про модернізацію компенсаторів, спираючись на конфігурацію вільної камери? Це рішення базується на низці переваг, які мають значення як для конструктивного оформлення, так і для зручності експлуатації.

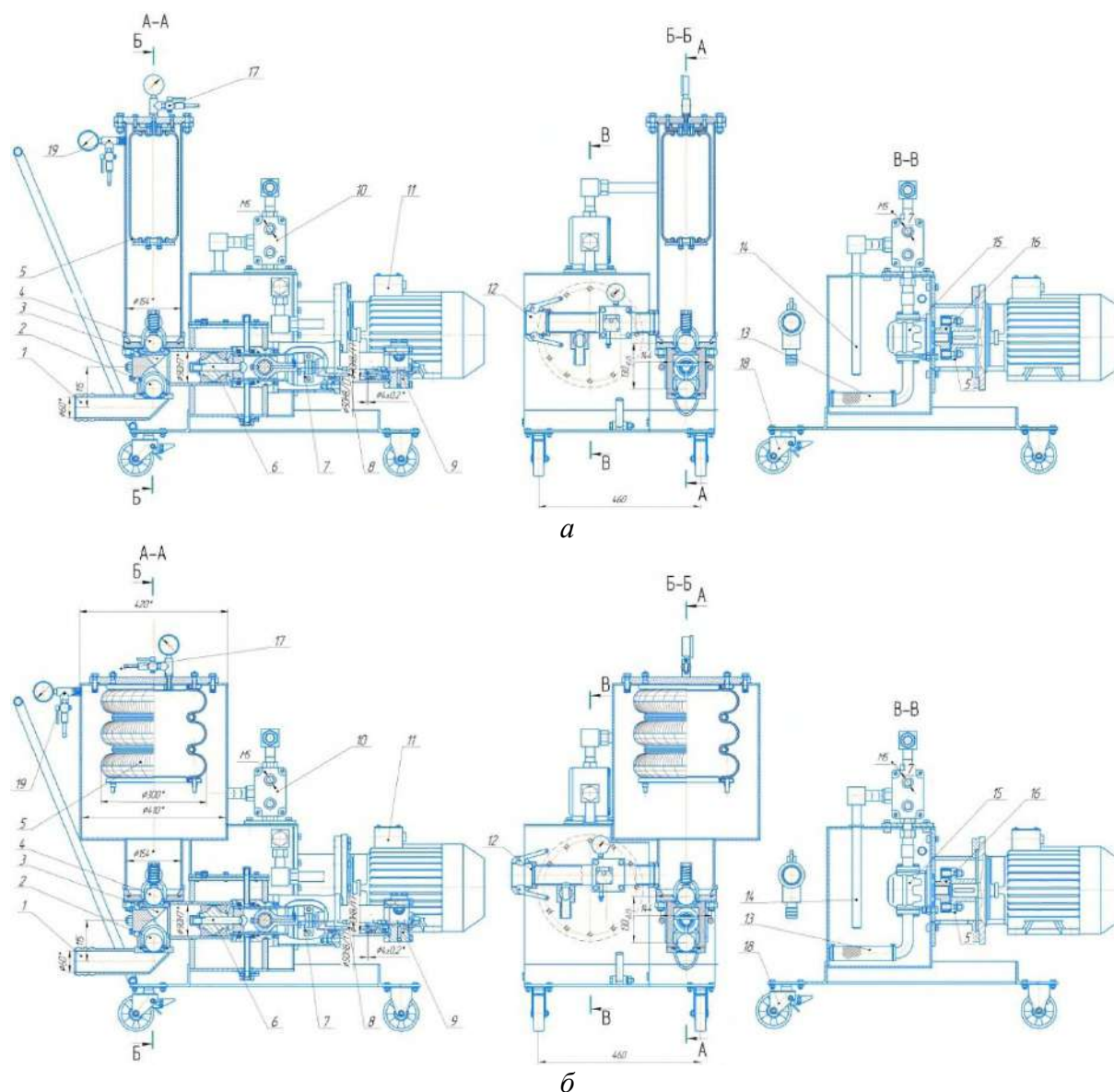


Рис. 5. Однопоршневий гідроприводний розчинонасос

із комбінованими компенсаторами різних конструктивних рішень:

- а – з комбінованим компенсатором № 1; б – з комбінованим компенсатором № 2;
 в – з комбінованим компенсатором № 3; 1, 12 – усмоктувальний та нагнітальний пат-
 рубок; 2, 4 – всмоктувальний та нагнітальний підпружинений кульові клапани;
 3 – усмоктувальна камера; 5 – комбінований компенсатор; 6 – поршень з направляю-
 чим плунжером; 7 – хомут гідравлічний привідний циліндр з розподільвачем; 8 – гідро-
 циліндр з поршнем і штоком; 9 – золотниковий розподільник; 10 – регулятор подачі гід-
 равлічної рідини; 11 – електродвигун; 13 – фільтр мастильної рідини;
 14 – патрубок скидання гідравлічної рідини; 15 – шестерневий гідравлічний насос;
 16 – муфта втулково-пальцева; 17 – редуктор підкачки повітря замкненої камери;
 18 – коліщата пересування насоса; 19 – редуктор підкачки повітря вільної камери

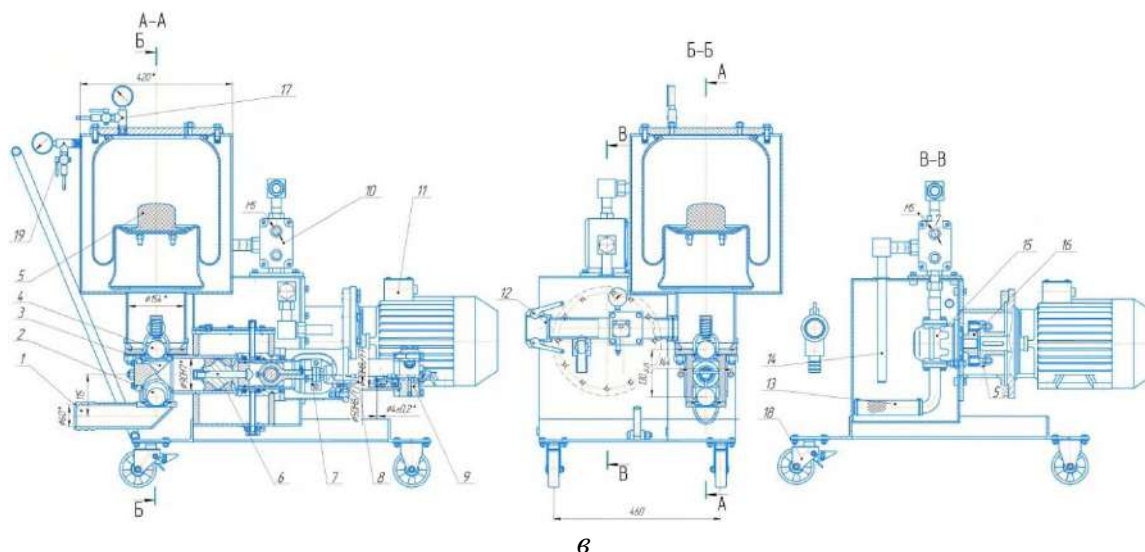


Рис. 5. Продовження (початок на с. 105)

Розглянемо доцільність застосування автомобільних пневмобалонів, зображених на рис. 5, у складі комбінованих компенсаторів, виконаних у вигляді замкненої камери.

Перевагами використання пневмобалонів, як замкненої камери, є:

- збільшення об'єму замкненої камери, що призводить до збільшення приведенного компенсаційного об'єму. Це позитивно впливає на зниження ступеня пульсацій тиску, особливо при його підвищенні понад 0,7 МПа;
- збільшення площі контакту замкненої камери з розчином, що перекачується, завдяки циліндричній формі пневмобалону. Це сприяє зменшенню ступеня пульсацій тиску;
- скорочення часу, необхідного для промивання вільної камери компенсатора після завершення робочого циклу, завдяки установці редуктора підкачки вільної камери;
- зменшення загальних витрат на обслуговування компенсатора;
- покращення можливостей ремонту компенсатора.

Висновки. Проаналізовано існуючі конструкції розчинонасосів. Були визначені переваги та недоліки використання розчинонасосів за конструктивними та експлуатаційними властивостями. Аналіз конструкцій розчинонасосів показав, що для перекачування штукатурних та будівельних розчинів необхідно використовувати розчинонасос вдосконаленої конструкції.

Однією з основних перспектив дослідження є подальша робота гідравлічного привода насоса, який повинен забезпечити постійну швидкість руху робочого органа, що позитивно вплине на зменшення зворотних витоків через кулькові клапани, забезпечить рівномірну подачу та низький рівень ступеня пульсацій тиску. Також застосування пневмобалонів у конструкціях комбінованих компенсаторів забезпечить низький рівень ступеню пульсацій тиску у такті всмоктування за рахунок конструкції замкненої камери та збільшеного приведенного об'єму вільної та замкненої камер компенсатора.

Представлені конструкції компенсаторів у складі гідроприводного розчинонасоса потребують практичного дослідження на предмет ефективності роботи та практичності під час експлуатації.

Загалом ця робота може зробити суттєвий внесок у розробку ефективних розчинонасосів для застосування їх у штукатурних агрегатах під час проведення опоряджувальних робіт на будівельному майданчику.

Список використаних джерел

1. Кукоба, А. (1999). Насос із гідравлічним приводом для подачі трубопроводами будівельних розчинів. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*, (Вип. 4. Ч 1.), 10–16.

2. Онищенко, О., Матвієнко, А., Коломієць, С., & Головкін, О. (2000). Компенсатор пульсації тиску. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*, (Вип. 6. Ч.1.), 3–6.
3. Смелянова, І., Коробко, Б. О., & Шаповал, М. В. (2010). *Малоімпульсний насос* (Патент України № 112734).
4. Korobko, B., Virchenko, V., & Shapoval, M. (2018). Feed solution in the pipeline with the compensators mortar pump of various design solutions pressure pulsations degree determination. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 195. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14402>.
5. Шаповал, М., Вірченко, В., Криворо, А. Т., & Скорик, М. (2021). Визначення трудомісткостей проведення технічного обслуговування середньорозмірних кросоверів. У *Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки* (с. 69–72). Національний університет імені Юрія Кондратюка. <https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/9321/1/69-72.pdf>.
6. Bogdan, K., Mykola, S., Kaczynski, R., Anatolii, K., & Viktor, V. (2023). Theoretical and experimental investigations of the pumping medium interaction processes with compensating volume of air in the single-piston mortar pump compensator. У *Lecture notes in civil engineering* (с. 199–223). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_17.
7. Кукоба, А.Т., Васильєв А.В. (2000). Дослідження об'ємного ККД гідроприводного розчинонасоса. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*, (Вип. 5), 19-24.
8. *Turbosol world wide news*. Turbosol - Pumping systems. <https://turbosol.com/blog/en/home>.
9. *About us-dedicated to your success*. Milton Roy Metering Pumps and Equipment. <https://www.miltonroy.com/en/about-us>.
10. Wilden Pumps from Air Pumping Ltd. *Air Pumping Ltd, diaphragm pump distributor*. <https://www.wilden-pumps.co.uk>.
11. Dellmeco. Pump manufacturer. If our partners succeed, then so does DELLMECO URL: <https://www.dellmeco.com>.
12. Tapflo Group – якісні Європейські промислові насоси від виробника TAPFLO. <https://tapflo.ua>.
13. *Бетонна техніка і бетононасоси*. Putzmeister Україна. <https://www.kvbukraine.com.ua>.

References

1. Kukoba, A. (1999). Nасos iz hidravlichnym pryvodom dlia podachi truboprovodamy budivelnikh rozchyniv. [Hydraulically driven pump for pipeline delivery of mortar.] (*Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo)*- *Collection of scientific papers (industrial engineering, construction*, (Iss. 4. S. 1.), 10–16.
2. Onyshchenko, O., Matviienko, A., Kolomiets, S., & Holovkin, O. (2000). Kompensator pulsatsii tysku. [Pressure pulsation compensator.] (*Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo)* - *Collection of scientific papers (industrial engineering, construction*, (Iss. 6. S. 1.), 3–6.
3. Yemelianova, I., Korobko, B.O., & Shapoval, M. V. (2010). Maloimpulsnyi nasos [Low-pulse pump] (*Patent Ukrainy - Patent of Ukraine № 112734*).
4. Korobko, B., Virchenko, V., & Shapoval, M. (2018). Feed solution in the pipeline with the compensators mortar pump of various design solutions pressure pulsations degree determination. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 195. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14402>.
5. Shapoval, M., Virchenko, V., Kryvoro, A. T., & Skoryk, M. (2021). Vyznachennia trudomistkosti provedennia tekhnichnoho obsluhovuvannia serednorozmirnykh krossoveriv [Determination of the labour intensity of maintenance of medium-sized crossovers]. *Stvorennia, ekspluatatsiia i remont avtomobilnoho transportu ta budivelnoi tekhniki – Creation, operation and repair of motor transport and construction equipment* (pp. 69-72). <https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/9321/1/69-72.pdf>.
6. Bogdan, K., Mykola, S., Kaczynski, R., Anatolii, K., & Viktor, V. (2023). Theoretical and experimental investigations of the pumping medium interaction processes with compensating volume of air in the single-piston mortar pump compensator. In *Lecture notes in civil engineering* (pp. 199–223). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17385-1_17.
7. Kukoba, A.T., Vasulev A.V. (2000). Doslidzhennia obiemnoho KKD hidropryvodnoho rozchynonasosa. [Study of the volumetric efficiency of a hydraulically driven mortar pump.] (*Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo)* - *Collection of scientific papers (industrial engineering, construction*, (5), 19-24.
8. TURBOSOL: BLOG. (n.d.). <https://turbosol.com/blog/en/home>.

9. Milton Roy. (n.d.). <https://www.miltonroy.com/en/about-us>.
10. Wilden Pumps from Air Pumping Ltd. URL: <https://www.wilden-pumps.co.uk>.
11. Dellmeco. Pump manufacturer. If our partners succeed, then so does DELLMECO. (n.d.). <https://www.dellmeco.com>.
12. Tapflo Group – high-quality European industrial pumps from the manufacturer TAPFLO. Official representative office in Ukraine – LLC "TAPFLO". (n.d.). sales@tapflo.ua. <https://tapflo.ua>.
13. Putzmeister: Betonna tekhnika i betononasosy [Concrete equipment and concrete pumps]. (n.d.). putzmeister.ukr@gmail.com. <https://www.kvbukraine.com.ua>.

Отримано 20.03.2025

UDC 693.6.002.5

Mykola Shapoval¹, Vadym Mykhaylik², Anatoliy Kryvorot³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of branch machinery and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)

E-mail: nvshapoval75@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6943-7687>

²PhD Student, Department of branch machinery and mechatronics

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)

E-mail: v.mikhajlik1988@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2435-8592>

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of branch machinery and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)

E-mail: anatoliikryvorot@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5919-7352>

ANALYSIS OF THE DESIGN OF A HYDRAULIC MORTAR PUMP WITH VARIOUS COMBINED COMPENSATORS

Analysis of modern pumps indicates the search for ways to simplify their designs and improve the basic scheme of single-piston mortar pumps while minimizing pulsations in the pipeline during the transportation of building mortars.

To reduce pulsations in modern single-piston mortar pumps, pressure compensators in the form of air caps of various volumes are used. But air compensators, along with their advantages, have significant disadvantages: compressed air directly contacts the pumped solution and is intensively removed from the cap during the operation of the mortar pump. Air removal is especially accelerated at elevated pressure (above 1.2...1.5 MPa). In this case, the efficiency of the compensator is significantly reduced, and pulsations increase.

There is a need to create single-piston mortar pumps of increased reliability due to the use of a hydraulic drive, which will level the transverse forces on the cylinder-piston group, and reduce the level of pressure pulsations and mortar supply, ensure smooth regulation of the supply during operation, and should also increase productivity and volumetric efficiency compared to the electromechanical drive. Therefore, development and implementation of hydraulic drives together with a combined compensator will ensure effective operation of mortar pumps when pumping mortars and lightweight concrete.

Key words: mortar pump; combined compensator; degree of pressure pulsations; closed chamber; mortar.

Fig.: 5. References: 13.

**Сергій Леонідович Шваб¹, Михайло Михайлович Ворон²,
Андрій Миколайович Тимошенко³, Анастасія Юрївна Семенко⁴,
Юлія Петрівна Скоробагатько⁵, Олексій Миколайович Смірнов⁶**

¹кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник,
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)

E-mail: serg.schwab@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4627-9786>

²кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: mihail.voron@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0804-9496>

³кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

E-mail: marschal@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4038-1744>

⁴кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

E-mail: semenko.au@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>

⁵кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

E-mail: yulka.ukr@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1724-9895>

⁶доктор технічних наук, професор, завідувач відділу
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

E-mail: stalevoz@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРО- ТА ФАЗОУТВОРЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ВИСОКОМАРГАНЦЕВОЇ СТАЛІ Fe-28Mn-11Al-1.2C, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРИСАДНОГО ДРОТУ Св-08Г2С-О

З метою визначення можливості застосування промислових рішень для зварювання сталей системи Fe-Mn-Al-C, було проведено зварювання пластин товщиною 8 мм високомарганцевої легкої сталі Fe-28Mn-11Al-1.2C присадним дротом марки Св-08Г2С-О з попереднім підігрівом. Були вивчені особливості формування мікроструктури отриманого з'єднання. У результаті експериментальних досліджень показано, що в зоні металу шва формуються дві зони, які відрізняються за хімічним складом. Аналіз мікротвердості в різних зонах зварного з'єднання показав, що ця характеристика має найнижчі значення в зоні зварного шва та в зоні сплавлення, де вони мають близькі значення на рівні 300-360 HV, зона перегріву характеризується поступовим підвищенням мікротвердості з 320 до 486 HV.

Ключові слова: високомарганцеві сталі; TWIP; зварювання; мікроструктура; мікротвердість.

Рис.: 7. Бібл.: 15.

Вступ. Високомарганцеві сталі з високим вмістом алюмінію належать до числа одних із найбільш інноваційних матеріалів сучасності завдяки поєднанню високої питомої міцності та пластичності. Їхні механічні характеристики значно перевищують показники більшості конструкційних сталей та можуть змінюватись у широких межах завдяки поєднанню термічної та деформаційної обробки. Такі матеріали є важливими для екологічної парадигми в сучасних технологіях, адже дозволяють суттєво знизити масу машин і механізмів, і як наслідок – зменшити споживання ними палива або електроенергії. Це досягається за рахунок нижчої на 5-20 % густини, порівняно зі звичайними сталями [1-4].

Механічні властивості високомарганцевих сталей із високим вмістом алюмінію залежать від хімічного складу та співвідношення легуючих елементів, що визначає їхні структурно-фазові характеристики й механічні властивості. Вони можуть бути феритними, аустенітними та дуплексними, залежно від кількості марганцю (частіше 15-30 % мас.) та алюмінію (частіше 7-12 % мас.) [5-7]. Марганець та вуглець є стабілізаторами аустеніту, в той час як алюміній та більшість корисних мікродобавок, таких як ванадій, молібден, титан та кремній є стабілізаторами фериту. Вміст алюмінію вище 7 % мас. визначає можливість формування к-карбідів та значною мірою визначає фазовий склад і механізми зміцнення у високомарганцевих сталях [5; 8; 9]. Вміст вуглецю для них зазви-

чай становить 0,6-1,2 % мас. [10]. Власне, вміст марганцю збільшується прямопропорційно вмісту алюмінію. Таким чином, найбільш перспективними та досліджуваними високоміцними високомарганцевими сталями з низькою густиною є ті, що мають хімічний склад у таких межах (% мас.): Fe-(25-30)Mn-(7-12)Al-(0,6-1,2)C з можливим додаванням мікролегуєчих і модифікуючих добавок [3; 10]. Також дані аустенітні сталі системи Fe-Mn-Al з високим вмістом марганцю і з гарним поєднанням міцності та пластичності мають назву TWIP (Twinning-Induced Plasticity) сталі.

Виробництво описаного типу матеріалів є відповідальною та непростою задачею через їхню високу схильність до утворення дефектів та ліквацій. Це також зумовлює складність їх обробки та особливо зварювання [11]. Для зварювання високомарганцевих сталей із різним вмістом алюмінію застосовують декілька методів і технологічних підходів, серед яких найбільш популярними є лазерне та електродугове зварювання [12]. Враховуючи високі значення коефіцієнта температурного розширення та складність і багатостадійність фазових перетворень у сталях системи Fe-Mn-Al-C з високим вмістом марганцю та алюмінію, важливе значення при їх зварюванні має швидкість охолодження зварного з'єднання [13].

Вибір присадних матеріалів для зварювання таких сталей є також актуальною задачею. Найкращі властивості зварних з'єднань вдається одержати при використанні присадних матеріалів, подібних за хімічним складом до основного металу, але одержання таких дротів та їх застосування є складним і вартісним завданням [14].

Таким чином, зварювання високомарганцевих сталей, особливо з високим вмістом алюмінію, є важливою та непростою задачею, для якої досі залишаються невирішеними питання оптимізації багатьох технологічних параметрів і зниження загальної вартості процесу [15].

Для поглиблення аналізу описаних проблем та пошуку можливих методів їх вирішення, було проведено дослідження зі зварювання високомарганцевої легкої сталі Fe-28Mn-11Al-1.2C присадним дротом марки Св-08Г2С-О.

Хімічний склад сталі було обрано з урахуванням підвищення складності роботи з матеріалом. Вказаний вміст марганцю та алюмінію міг спричинити підвищення тріщеноутворення, стати причиною виникнення шкідливих неоднорідних ліквацій а також сприяти утворенню шкідливих фаз у зоні сплавлення. Високий вміст вуглецю міг спричинити утворення відманштеттової структури та карбідів, що залежно від розмірів та розподілу останніх могло суттєво знизити однорідність та надійність зварного з'єднання.

Використання як присадного дроту матеріалу з хімічним складом, який є максимально близьким до зварюваного металу, є непростою задачею через високу технологічну складність виготовлення відповідного дроту. Застосування поширеного й відносно дешевого присадного матеріалу для зварювання сталей із високим вмістом марганцю та алюмінію може мати достатній ефект, але потребує досліджень.

Основною метою на цьому етапі є вивчення закономірностей формування мікроструктури зварного з'єднання з експериментальної високомарганцевої сталі Fe-28Mn-11Al-1.2C, отриманого за допомогою зварювання плавленням з присадним низьколегованим дротом.

Методи досліджень. Для одержання зварного з'єднання використовувались пластини, вирізані з вилівка сталі Fe-28Mn-11Al-1.2C товщиною 8 мм. Відповідно до ISO 9692-1 (Welding and allied processes — Types of joint preparation) для цієї товщини зразків була зроблена V-подібна розробка крайок з кутом розкриття 60° та притупленням в 1 мм. Як присадний матеріал використовувався дріт марки Св-08Г2С-О діаметром 1,6 мм. Зварювання відбувалося способом MAG в суміші захисних газів Ar+CO₂. Як джерело живлення використовувався зварювальний апарат OTC DAIHEN WELBEE P500L, оснащений механізмом подачі дроту.

Для збереження геометрії зварного з'єднання, мінімізації короблень та деформації, пластини фіксувались спеціальною оснасткою, розміщеною в теплоізолюваному модулі з можливістю контрольованого індукційного підігріву металу до 400 °С та подальшого контрольованого охолодження заготовок. Нагрів та витримка пластин тривали 1 та 2 години відповідно. Процес зварювання відбувався в два проходи на такому режимі: струм 200 А, напрузі 26 В, швидкість подачі дроту 3 м/хв, швидкість зварювання 22-25 м/год, витрати захисного газу 15 л/хв. Охолодження зразка тривало 4 години, що відповідало швидкості охолодження 1,5 °С/хв. Зовнішній вигляд зварного з'єднання показано на рис. 1.

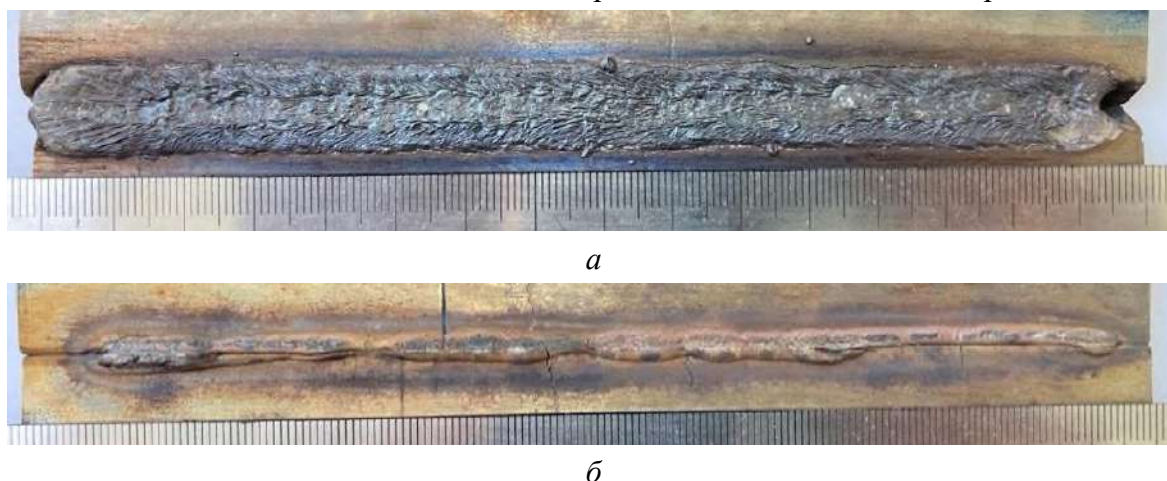


Рис. 1. Зовнішній вигляд зварного з'єднання (а) та зворотного формування шва (б) у стані повного охолодження

Як видно з рис. 1, при зварюванні пластин утворилися дефекти у вигляді тріщин. Їх формування в центральній частині може бути частково пов'язане зі стовпчастою макро-структурою литого металу. Іншим фактором утворення тріщин є збільшення напружень, які можуть виникати через термічний вплив та через фазові перетворення, до яких він призводить. На це вказує більша локалізація тріщин саме в центральній частині з'єднання зі сторони кореня шва – в місці, де найдовше зберігається висока температура.

Одержане зварне з'єднання піддавали візуальному аналізу та подальшій механічній обробці з метою одержання поперечного макрошліфа (рис. 2), який виготовляли за стандартними методиками. Його травлення проводили в спиртовому розчині 3 % HNO_3 + 5 % HCl .

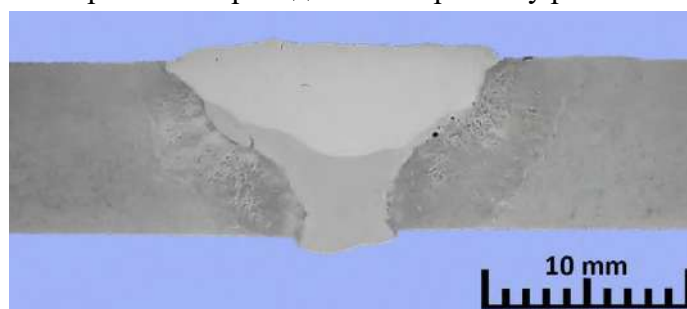


Рис. 2. Макрошліф зварного з'єднання

Для дослідження мікроструктури зварного з'єднання (рис. 3) використовували оптичний металографічний мікроскоп Euromex iScore та скануючий електронний Tescan Vega 3, оснащений EDX-детектором Bruker, що дозволяло визначати локальний хімічний склад та розподіл хімічних елементів досліджуваних областей зварного з'єднання. Для мікро-дюротметричних досліджень використовували мікротвердомір LHVS-1000Z з автоматичною туреллю, який забезпечує можливість вимірювання мікротвердості за методом Віккерса з навантаженням від 10 г до 1000 г.

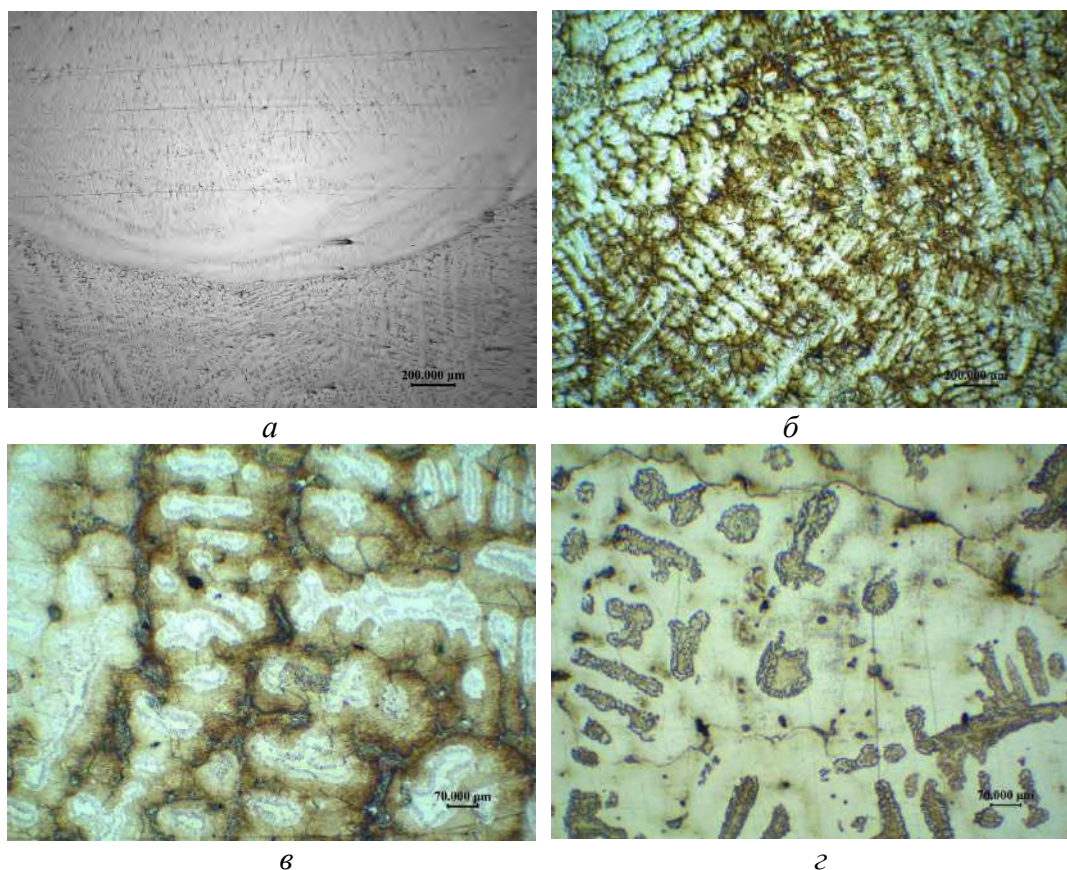


Рис. 3. Мікроструктура металу шва (а), основного металу (б, в), та зони термічного впливу (г)

Результати досліджень і їх обговорення. Аналіз будови макрошліфа (рис. 2) показує наявність двох чітко розділених зон в металі шва (рис. 3, а). Нижча, більш темна вузька зона, очевидно, є більш легованою через більші питомі тепловкладення при зварюванні, що призвели до помітного підплавлення та замішування металу зварюваних пластин в зону надходження присадного металу. Після того як ширина зварного шва в процесі формування починає перевищувати 5 мм, цей температурно-гідродинамічний ефект зникає, замішування основного металу в метал шва знижується, а в області їх контакту можна побачити мікрodefекти.

Структура основного металу є дендритною (рис. 3, б) та однофазною (рис. 3, в). У зоні термічного впливу, зокрема в зоні рекристалізації, де можна помітити збільшення чіткості границь зерен та зміну їх вигляду з дендритного до більш рівновісного. При цьому всередині зерен починають утворюватися структурно-фазові складові, яких не було помітно в початковому стані.

Для більш детального вивчення будови зварного з'єднання було розглянуто ділянки, які поєднують зону металу шва, зону сплавлення та зону перегріву (рис. 4). У верхній частині металу шва з обох боків помітне утворення тріщин протяжністю близько 300-1200 мкм, які формуються на межі зони сплавлення та металу шва, яка становить 100-200 мкм (рис. 4, а).

У центральній частині зони зварного з'єднання розміри зони сплавлення є зіставними з попередньою ділянкою, але формування тріщин відбувається з напрямку металу-основи й часто поєднується з межами зерен. Це вказує на високу імовірність виникнення тріщин саме на границях зерен, які стають більш дефектними під впливом термічних навантажень та згодом слугують причиною розвитку дефектів у тріщини. Також в цій зоні спостерігається утворення пор, розмір яких коливається від 30-40 до 200 мкм (рис. 4, б).

Нижня частина з'єднання, корінь шва, має найширшу зону сплавлення до 500-600 мкм та найнижчу дефектність, що зокрема пов'язано з найвищим тепловкладенням та найповільнішим охолодженням металу (рис. 4, в).

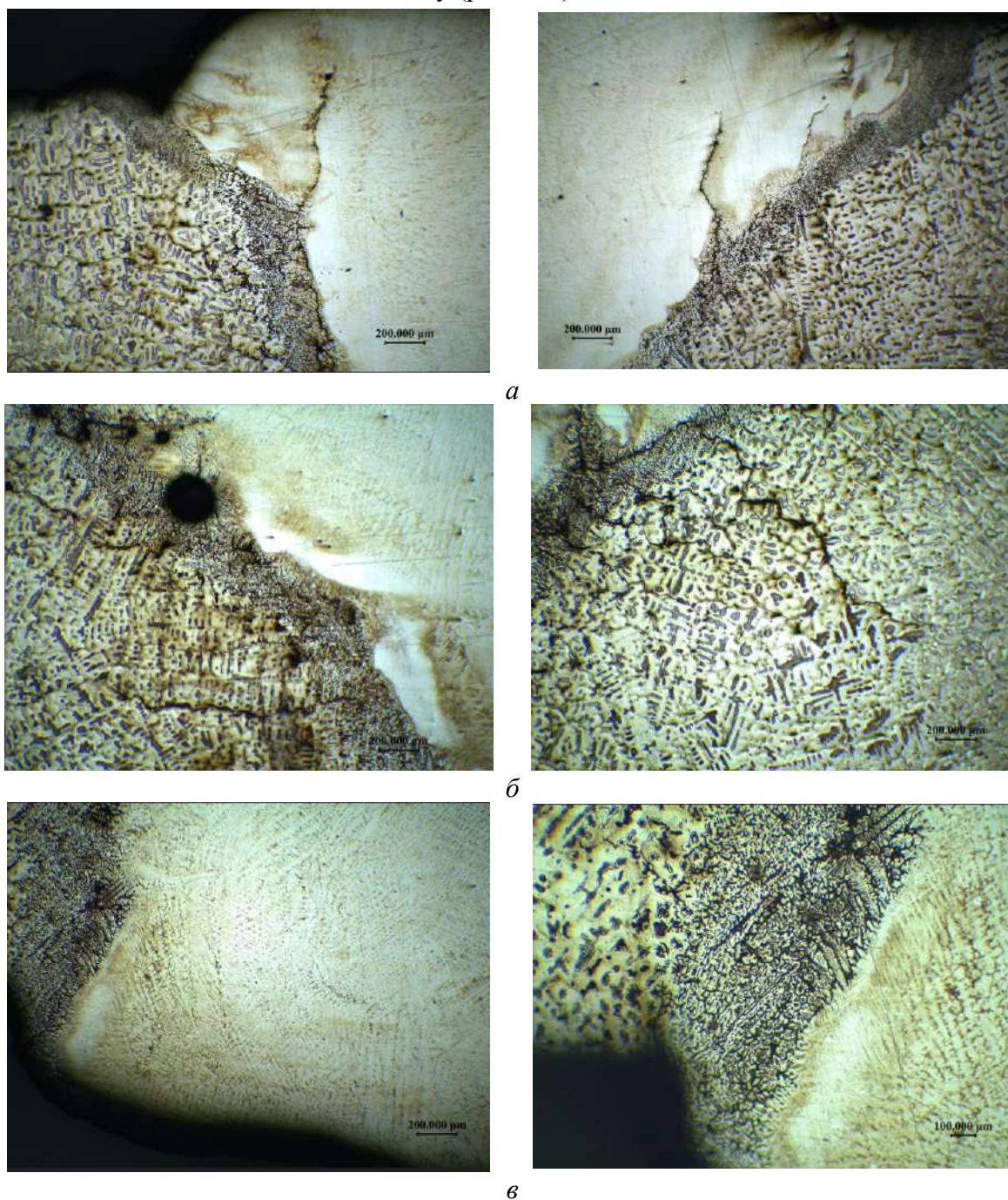


Рис. 4. Мікроструктура зони металу шва, зони сплавлення та початку зони перегріву верхньої (а), центральної (б) та нижньої (в) частини зварного з'єднання

Зона перегріву різних ділянок зварного з'єднання має нерівномірну неоднакову будову, як показано на рис. 5. Нижня область біля кореня шва (рис. 5, в) має прошарок перекристалізованої подрібненої дендритної структури завширшки 1,2 мм у самому низу, який майже повністю зникає на відстані 5 мм в сторону основного металу, що відповідає рівню розділення металу шва на дві ділянки. Зона перегріву нижньої частини шва, не враховуючи вже описану ділянку, складає близько 1,5 мм.

Центральна (рис. 5, б) та верхня (рис. 5, а) частини зварного з'єднання мають зону перегріву, яка поступово зменшується від 1,5 до 0,6-0,8 мм у напрямку до вершини шва.

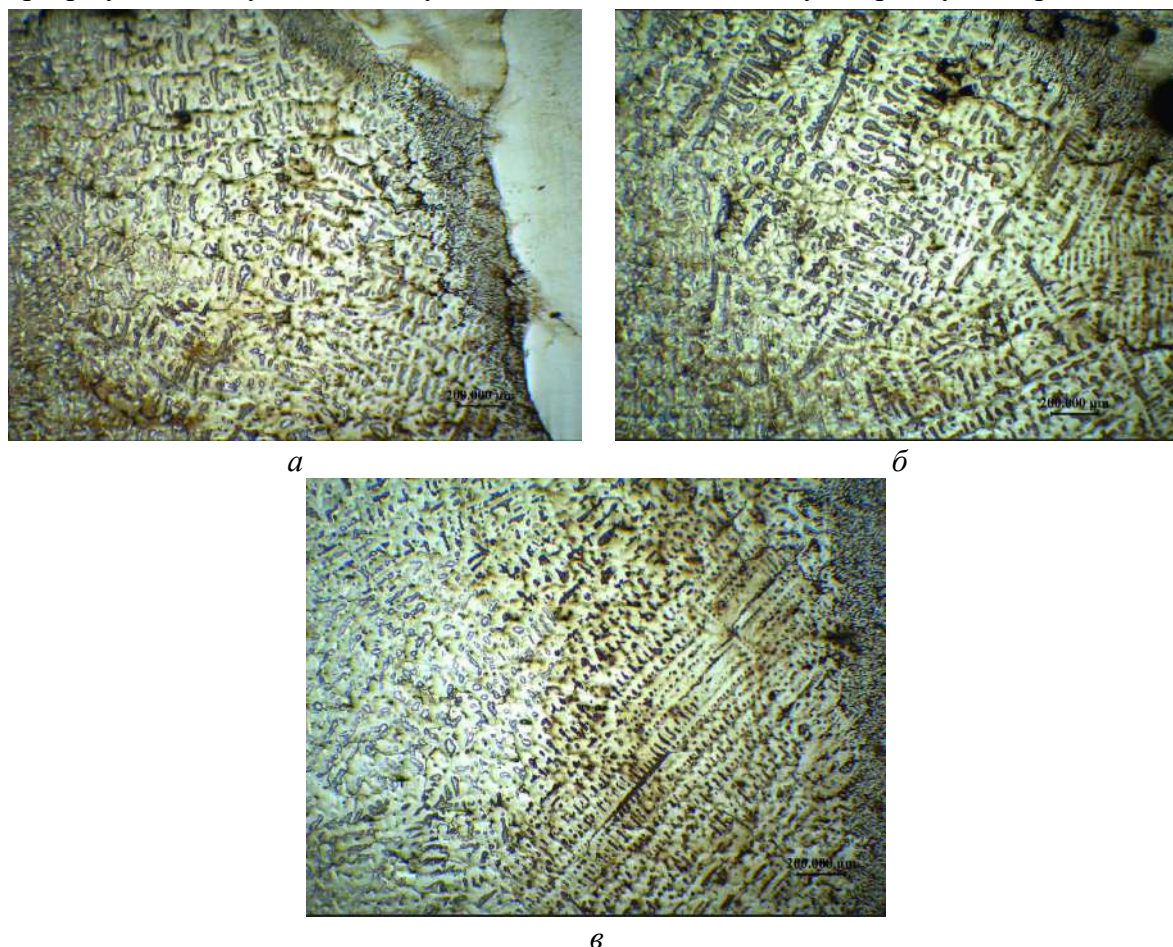


Рис. 5. Мікроструктура зони перегріву та початок зони нормалізації верхньої (а), центральної (б) та нижньої (в) частини зварного з'єднання

Щоб виявити можливий зв'язок між утворенням дефектів, ліквідаціями та фазоутворенням, було проведено локальний хімічний аналіз та аналіз розподілу елементів у дефектній зоні зварного з'єднання. Відповідні дані наведено на рис. 6.

Проведений аналіз показує, що в процесі утворення шва, в нього надходить доволі значна кількість компонентів з основного металу. Концентрація алюмінію та марганцю у верхній частині шва є меншою, ніж біля його кореня. При цьому масоперенос від основного металу в обох ділянках відбувається майже однаково, про що свідчить близький хімічний склад зони сплавлення. Різниця складу в металі шва є помітною через більший об'єм рідкометалевої ванни, відповідно – більше розбавлення розчинених у цій ванні елементів. Такий рівень насичення металу шва марганцем та алюмінієм, а також рівномірний градієнт їх концентрації є позитивним фактором для формування властивостей зварного з'єднання.

Розподіл елементів показав, що у верхній частині шва по межах зерен основного металу та в тріщинах є дещо вища концентрація алюмінію. У нижній частині шва в зоні сплавлення та частково в зоні перегріву помітне утворення фаз, які містять одночасно підвищений вміст заліза та алюмінію та являються феритними дендритами, на що вказує їхня форма. Дефекти у вигляді пор, імовірно за все усадкового походження, утворились у зоні сплавлення. Поблизу пор ділянки мають занижену концентрацію алюмінію і підвищений вміст марганцю. З розподілу також видно, що в металі шва нижньої частини є вищою неоднорідність розподілу хімічних елементів.

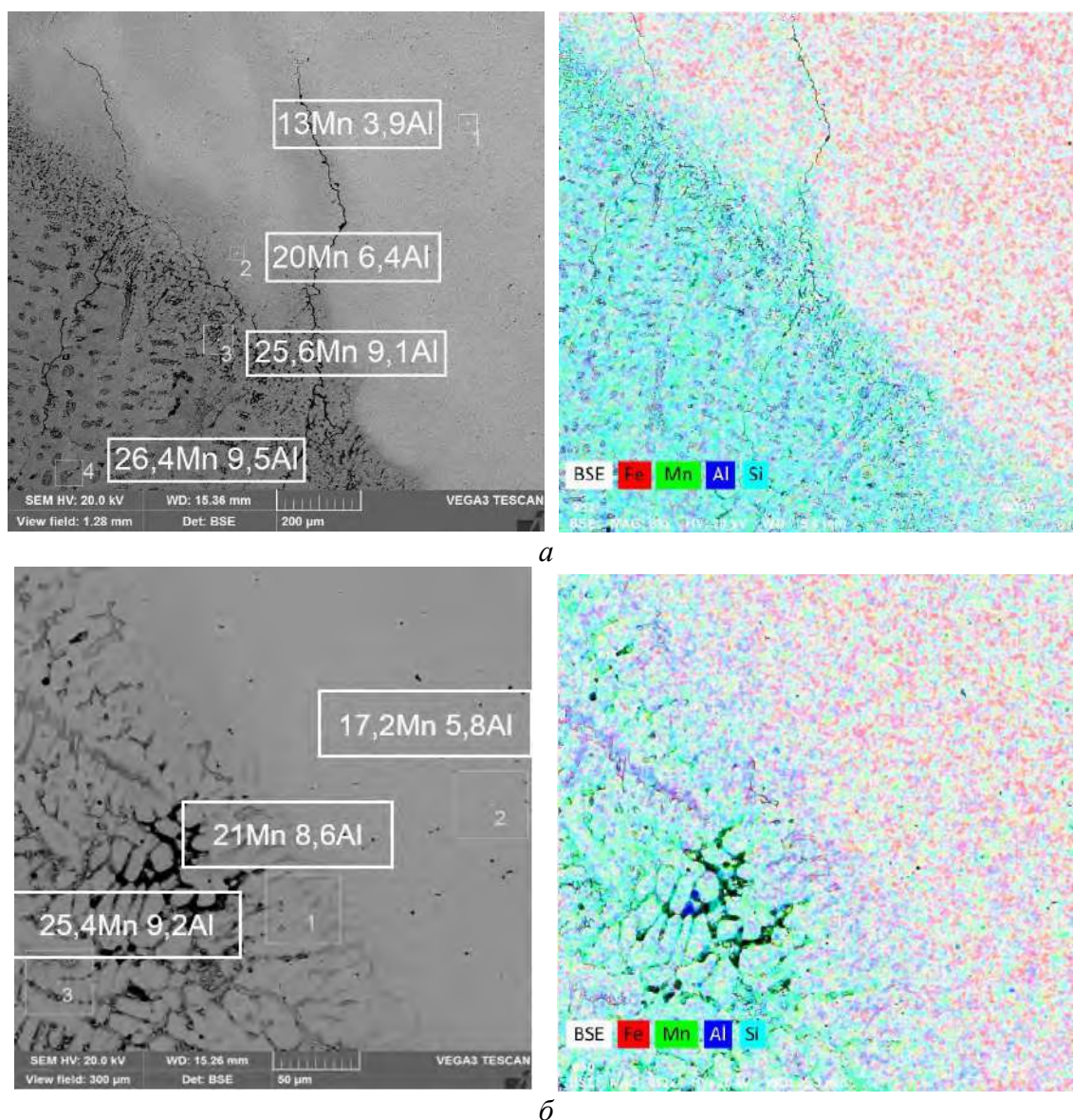


Рис. 6. Локальний хімічний аналіз та аналіз розподілу елементів у верхній (а) та нижній (б) частині зварного з'єднання біля зони сплавлення в місцях існування дефектів

Загалом, ліквідаційні явища, структуро- та фазоутворення в розглянутому зварному з'єднанні є доволі сприятливими та вказують на мінімізацію анізотропії властивостей. Тим не менш, вони не можуть бути однорідними і формування властивостей залежить від контрасту їх зміни в кожній структурно-фазовій області, що можна визначити через зміну мікротвердості. Відповідні дані показано на рис. 7.

Аналіз мікротвердості в різних зонах зварного з'єднання показав, що ця характеристика має найнижчі значення в зоні зварного шва та в зоні сплавлення, де вони мають близькі значення на рівні 300-360 HV. Зона перегріву характеризується поступовим підвищенням мікротвердості з 320 до 486 HV. Локальні підвищення значень біля меж структурних зон є нормальним явищем, яке вказує на підвищену дефектність меж зіткнення двох та більше типів структур, і чим більшим є такий екстремум – тим більш негативним буде вплив цієї зони на механічні властивості. Зона нормалізації характеризується дещо підвищеними значеннями мікротвердості як фериту, так і аустеніту. Близькість їх значень вказує на те, що така структурна зона має сприятливі структурно-фазові та механічні характеристики, які є більш однорідними, ніж у зоні основного металу.

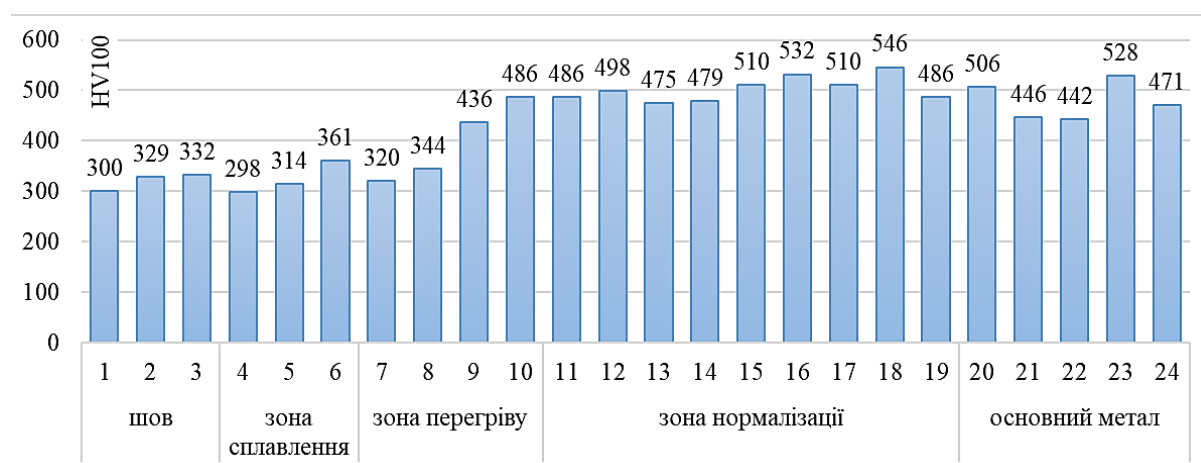


Рис. 7. Значення мікротвердості різних структурних зон одержаного зварного з'єднання

Висновки. У результаті дослідження зварювання сталей системи Fe-Mn-Al-C плавним електродом у суміші захисних газів, на прикладі пластин сталі Fe-28Mn-11Al-1.2C товщиною 8 мм з використанням присадного дроту марки Св-08Г2С-О в умовах попереднього підігріву пластин показано, що метал зварного шва складається із двох зон, які є відмінними за своїм хімічним складом та дефектністю. Більші тепловкладення та повільніше охолодження зварного з'єднання сприяють зменшенню дефектів, розширенню зони сплавлення та більш сприятливому структуроутворенню. Досить рівномірний градієнт концентрації легуючих елементів у зоні металу шва та поступова зміна мікротвердості в різних зонах зварного з'єднання вказують на можливу практичну придатність запропонованого підходу зварювання високомарганцевих сталей з високим вмістом алюмінію промисловим присадковим дротом і вказаним способом зварювання. Для покращення структурно-фазових характеристик зварного з'єднання можна застосовувати наступну термічну обробку у вигляді нормалізації.

Подяка. Дослідження фінансується Національним фондом досліджень України, конкурс «Наука для зміцнення обороноздатності України» (проект № 2023.04/0021), «Одержання елементів броні з надлегких сталей для військової техніки з використанням вторинної сировини». Дослідження хімічного складу, оптичної металографії та мікротвердості проводили в Центрі наукового обладнання колективного користування «Матеріалознавство тугоплавких сполук і композитів» (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»), співробітникам якого висловлюємо подяку.

Список використаних джерел

1. Raabe, D., Tasan, C. C., & Olivetti, E. A. (2019). Strategies for improving the sustainability of structural metals. *Nature*, 575, 64–74. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1702-5>.
2. Tucker, R. (2013). Trends in automotive lightweighting. *Metal Finishing*, 111(2), 23–25. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(13\)70158-2](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(13)70158-2).
3. Chen, S., & Rana, R. (2021). Low-density steels. In Rana R. (Ed.), *High-performance ferrous alloys* (pp. 211–289). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53825-5_6.
4. Piston, M., Bartlett, L., Limmer, K. R., & Field, D. M. (2020). Microstructural influence on mechanical properties of a lightweight ultrahigh strength Fe-18Mn-10Al-0.9C-5Ni (wt%) steel. *Metals*, 10(10), 1305. <https://doi.org/10.3390/met10101305>.
5. Chen, S. P., Rana, R., Haldar, A., & Ray, R. K. (2017). Current state of Fe-Mn-Al-C low density steels. *Progress in Materials Science*, 89, 345–391. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.05.002>.

6. Ding, H., Liu, D., Cai, M., & Zhang, Y. (2022). Austenite-based Fe-Mn-Al-C lightweight steels: research and prospective. *Metals*, 12(10), 1572. <https://doi.org/10.3390/met12101572>.
7. Grässel, O., Krüger, L., Frommeyer, G., & Meyer, L. W. (2000). High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development – properties – application. *International Journal of Plasticity*, 16(10-11), 1391–1409. [https://doi.org/10.1016/s0749-6419\(00\)00015-2](https://doi.org/10.1016/s0749-6419(00)00015-2).
8. Wu, Z. Q., Ding, H., An, X. H., Han, D., & Liao, X. Z. (2015). Influence of Al content on the strain-hardening behavior of aged low density Fe-Mn-Al-C steels with high Al content. *Materials Science and Engineering: A*, 639, 187–191. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.05.002>.
9. Chao, C.-Y., & Liu, C.-H. (2002). Effects of Mn contents on the microstructure and mechanical properties of the Fe-10Al-xMn-1.0C alloy. *Materials Transactions*, 43(10), 2635–2642. <https://doi.org/10.2320/matertrans.43.2635>.
10. Bouaziz, O., Allain, S., Scott, C. P., Cugy, P., & Barbier, D. (2011). High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: a review of the microstructure properties relationships. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 15(4), 141–168. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2011.04.002>.
11. Keil, D., Zinke, M., & Pries, H. (2011). Weldability of novel Fe-Mn high-strength steels for automotive applications. *Weld World*, 55, 21–30. <https://doi.org/10.1007/BF03321539>.
12. Gürol, U. (2023). Welding of high manganese austenitic cast steels using stainless steel covered electrode. *International Journal of Metalcasting*, 17, 1021–1033. <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00834-5>.
13. Curiel-Reyna, E., Herrera, A., Castaño, V. M., & Rodriguez, M. E. (2005). Influence of cooling rate on the structure of heat affected zone after welding a high manganese steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 20(5), 813–822. <https://doi.org/10.1081/amp-200055142>.
14. Dahmen, M., Lindner, S., Monfort, D., & Petring, D. (2016). Weld metallurgy and mechanical properties of high manganese ultra-high strength steel dissimilar welds. *Physics Procedia*, 83, 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.036>.
15. Шваб, С. Л., Семенко, А. Ю., Скоробагатько, Ю. П., Смірнов, О. М., Ворон, М. М., Тимошенко, А. М. (2024). Проблеми зварювання високомарганцевих сталей. *Науково-технічний журнал Металознавство та обробка металів*, 30(4), 51–61. <https://doi.org/10.15407/mom2024.04.051>.

References

1. Raabe, D., Tasan, C. C., & Olivetti, E. A. (2019). Strategies for improving the sustainability of structural metals. *Nature*, 575, 64–74. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1702-5>.
2. Tucker, R. (2013). Trends in automotive lightweighting. *Metal Finishing*, 111(2), 23–25. [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(13\)70158-2](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(13)70158-2).
3. Chen, S., & Rana, R. (2021). Low-density steels. In Rana R. (Ed.), *High-performance ferrous alloys* (pp. 211–289). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53825-5_6.
4. Piston, M., Bartlett, L., Limmer, K. R., & Field, D. M. (2020). Microstructural influence on mechanical properties of a lightweight ultrahigh strength Fe-18Mn-10Al-0.9C-5Ni (wt%) steel. *Metals*, 10(10), 1305. <https://doi.org/10.3390/met10101305>.
5. Chen, S. P., Rana, R., Haldar, A., & Ray, R. K. (2017). Current state of Fe-Mn-Al-C low density steels. *Progress in Materials Science*, 89, 345–391. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.05.002>.
6. Ding, H., Liu, D., Cai, M., & Zhang, Y. (2022). Austenite-based Fe-Mn-Al-C lightweight steels: research and prospective. *Metals*, 12(10), 1572. <https://doi.org/10.3390/met12101572>.
7. Grässel, O., Krüger, L., Frommeyer, G., & Meyer, L. W. (2000). High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development – properties – application. *International Journal of Plasticity*, 16(10-11), 1391–1409. [https://doi.org/10.1016/s0749-6419\(00\)00015-2](https://doi.org/10.1016/s0749-6419(00)00015-2).
8. Wu, Z. Q., Ding, H., An, X. H., Han, D., & Liao, X. Z. (2015). Influence of Al content on the strain-hardening behavior of aged low density Fe-Mn-Al-C steels with high Al content. *Materials Science and Engineering: A*, 639, 187–191. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.05.002>.
9. Chao, C.-Y., & Liu, C.-H. (2002). Effects of Mn contents on the microstructure and mechanical properties of the Fe-10Al-xMn-1.0C alloy. *Materials Transactions*, 43(10), 2635–2642. <https://doi.org/10.2320/matertrans.43.2635>.
10. Bouaziz, O., Allain, S., Scott, C. P., Cugy, P., & Barbier, D. (2011). High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: a review of the microstructure properties relationships. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 15(4), 141–168. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2011.04.002>.

11. Keil, D., Zinke, M., & Pries, H. (2011). Weldability of novel Fe-Mn high-strength steels for automotive applications. *Weld World*, 55, 21–30. <https://doi.org/10.1007/BF03321539>.
12. Gürol, U. (2023). Welding of high manganese austenitic cast steels using stainless steel covered electrode. *International Journal of Metalcasting*, 17, 1021–1033. <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00834-5>.
13. Curiel-Reyna, E., Herrera, A., Castaño, V. M., & Rodriguez, M. E. (2005). Influence of cooling rate on the structure of heat affected zone after welding a high manganese steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 20(5), 813–822. <https://doi.org/10.1081/amp-200055142>.
14. Dahmen, M., Lindner, S., Monfort, D., & Petring, D. (2016). Weld metallurgy and mechanical properties of high manganese ultra-high strength steel dissimilar welds. *Physics Procedia*, 83, 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.036>.
15. Shvab, S. L., Semenko, A. Yu., Skorobahatko, Yu. P., Smirnov, O. M., Moron, M. M., Tymoshenko, A. M. (2024). Problemy zvariuvannia vysokomarhantsevykh stalei [Challenges in welding high manganese steels]. *Naukovo-tekhnichnyi zhurnal Metaloznavstvo ta obrobka metaliv – Scientific and technical journal "Metal Science and Metal Processing"* 30(4), 51–61. <https://doi.org/10.15407/mom2024.04.051>.

Отримано 19.04.2025

UDC 669.14:669.15-194:669.14.018.62

**Serhii Schwab¹, Mykhailo Voron², Andrii Tymoshenko³, Anastasiia Semenko⁴,
Yuliia Skorobagatko⁵, Oleksii Smirnov⁶**

¹PhD in Technical Sciences, Senior Researcher

E. O. Paton Institute of Electric Welding, NAS Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: serg.schwab@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4627-9786>

²PhD in Technical Sciences, Senior Researcher

Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: mihail.voron@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0804-9496>

³ PhD in Technical Sciences, Senior Researcher

Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: marschal@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4038-1744>

⁴ PhD in Technical Sciences, Senior Researcher

Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: semenko.au@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>

⁵ PhD in Technical Sciences, Senior Researcher

Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: yulka.ukr@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1724-9895>

⁶ Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department

Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: stalevoz@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>

FEATURES OF THE STRUCTURE AND PHASE FORMATION OF WELDED JOINTS OF HIGH-MANGANESE STEEL FE-28MN-11AL-1.2C OBTAINED BY SV-08G2S-O FILLER WIRE

To determine the possibility of using industrial solutions for welding steels of the Fe-Mn-Al-C system, welding of 8 mm thick plates of high-manganese light steel Fe-28Mn-11Al-1.2C was carried out with filler wire of the Sv-08G2S-O brand with preheating. The microstructure of the obtained joint was studied. Due to experimental studies, it was shown that two zones are formed in the weld metal zone, which differ in chemical composition. The Analysis of microhardness in different zones of the welded joint showed that this characteristic has the lowest values in the weld zone and in the fusion zone, where they have close values of the order of 300-360 HV, the overheating zone is characterized by a gradual increase in microhardness from 320 to 486 HV.

Keywords: high-manganese steels; TWIP; welding; microstructure; microhardness.

Fig.: 7. References: 15.

Олексій Володимирович Вовк

аспірант

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: aleksey1740vovk@gmail.com**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШЛІФУВАННЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ
ШЛЯХОМ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ**

Процес шліфування є одним з основних видів фінішної обробки металів на більшості виробництв не тільки України, а і світу. Однак під час шліфувальних операцій у зоні обробки значною мірою зростають температури, які викликають ряд дефектів готового виробу. Для покращення якості виробу температуру в зоні обробки потрібно знижувати. Для розуміння того які параметри впливають на зростання температури і яким чином можна знизити її розглядається математична модель побудована на основі рівняння теплопровідності. Представлена в статті інформація має оглядовий характер.

Ключові слова: шліфування; плоска поверхня; зниження температури різання; підвищення якості поверхні; рівняння теплопровідності.

Рис.: 2. Бібл.: 4.

Актуальність теми дослідження. Якість поверхонь готових виробів (деталей) безпосередньо впливає на якість деталі загалом та на її експлуатаційні характеристики. Доволі широко в ролі фінішних методів обробки використовується такий метод обробки, як шліфування. Під час шліфування будь-якої поверхні (циліндричної чи плоскої) відбувається знімання стружки великою кількістю ріжучих кромок, які вступають у контакт одночасно. Під час цього процесу відбувається виділення тепла. Однак при обробці плоских поверхонь складніше відбувається вивільнення такого тепла із зони обробки, і воно спричинює негативні наслідки на поверхневий шар оброблюваної поверхні, а саме, виникають припали, мікротріщини та інші дефекти як на поверхні обробленої деталі, так і в структурі поверхневого шару. Для усунення дефектів, тобто для підвищення ефективності обробки шліфуванням плоских поверхонь необхідно створити умови для зменшення температури в зоні обробки. Для розуміння того, що саме необхідно змінювати використовують математичні моделі.

Постановка проблеми. Регулювання температури в зоні обробки плоских поверхонь на сьогодні стоїть достатньо гостро і проводяться дослідження в цьому напрямку, оскільки в сучасних умовах висувуються достатньо жорсткі вимоги до деяких вузлів машин та агрегатів, у тому числі до шорсткості поверхонь цих з'єднань, що впливає на точність, довговічність тощо таких машин та агрегатів. І нині вплинути на температуру в зоні обробки можливо за рахунок використання мастильно-охолоджувального технологічного середовища, за рахунок конструкції абразивних кругів, зміни глибини шліфування, використання методів сухого охолодження стиснутим повітрям тощо. Однак щоб більш ефективно впливати на температуру процесу шліфування, необхідно зрозуміти шляхи її виникнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням щодо підвищення якості деталей під час процесу шліфування достатньо давно займається велика кількість дослідників, зокрема в роботах А. В. Якімова та В. А. Новікова [1-4] представлені способи зниження температури, виявлені на основі рівняння теплопровідності. Тобто основними запропонованими методами зниження температури в зоні шліфування є переривчасте шліфування, використання високо пористих абразивних кругів. Також Ф. В. Новіков запропонував звернути увагу на глибину проникнення тепла в поверхневий шар матеріалу, що оброблюється. Тобто не вважати його, не як нескінченний елемент, а як значення, яке має свої якісь границі, оскільки дослідники попередніх років вважали, що глибина проникнення тепла під час шліфування нескінченна, що ускладнює процес визначення розподілу цього тепла в стружку та в саму деталь.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз показав, що математична модель процесу шліфування плоских поверхонь, яка побудована на основі рівняння теплопровідності, не враховує розподілення тепла між стружкою та поверхневою деталлю через те, що не враховується глибина проникнення тепла.

Мета дослідження. Провести теоретичний аналіз розподілу тепла між стружкою та плоскою поверхнею деталі, що шліфується, та на цій основі визначити способи зменшення температури в зоні обробки.

Виклад основного матеріалу. У реальному процесі шліфування відбувається контакт із заготовкою не тільки зерен, а і зв'язки та зерен, які ковзають по поверхні заготовки. І в цьому випадку вже розглядають ті зерна, які беруть участь в обробці, то тепло, як і при обробці різанням, йде в стружку і невелика частина тепла в заготовку. Інше тепло, яке нагріває заготовку, отримується в результаті поверхневого тертя ковзаючих зерен, зв'язки та стружки, яка не має можливості вільно вивільнитися. Проте при побудові математичної моделі вважаємо, що джерело тепла є суцільним.

Спрощена розрахункова схема (рис. 1), у якій нагрів при обробці представлений у вигляді елементарних адіабатичних стрижнів, по яких відводиться тепло із зони різання в глиб деталі. Такий підхід спрощує розрахунки та зводиться до визначення закону розподілу температури вздовж адіабатичного стержня, на торці якого (в зоні контакту шліфувального круга та деталі) діє теплове джерело протягом часу τ із щільністю q .

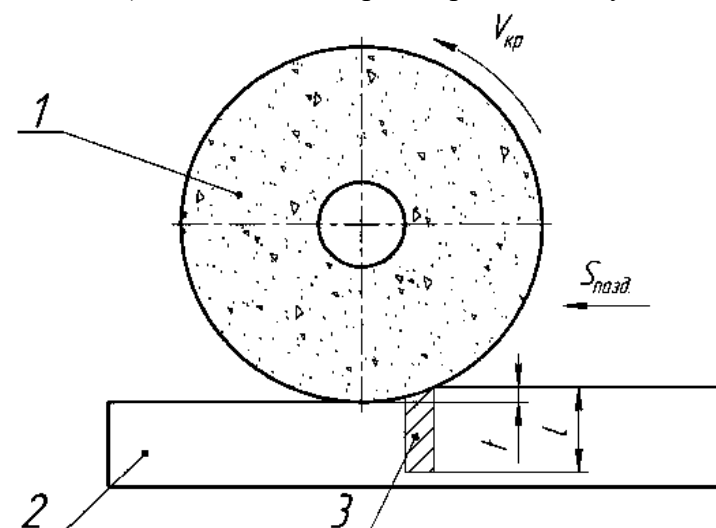


Рис. 1. Спрощена схема плоского шліфування [5]:
1 – абразивний круг, 2 – заготовка, 3 – адіабатичний стрижень,
 t – глибина різання (шліфування), l – глибина нагріву деталі

У цьому випадку максимальна температура θ в зоні обробки буде визначена за залежністю:

$$\theta = q \cdot \sqrt{\frac{\tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \quad (1)$$

де q – щільність теплового потоку, Вт/м²;
 λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·град);
 c – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·град);
 ρ – щільність матеріалу, кг/м³.
 τ – час дії теплового джерела, с;

Однак така залежність не дає можливості визначити дійсну глибину z проникнення тепла в деталь. Вирішується ця проблема введенням початкового θ_n та кінцевого значення температури θ_k ($d\theta = \theta_n - \theta_k$), для спрощення розрахунків водяться такі значення $\theta_k=0$, $\theta_n = \theta$. Та водимо глибину проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної заготовки l_2 ($dx=l_2$). Тоді:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda} = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \quad (2)$$

З цього рівняння видно, що чим більше l_2 , тим більша температура θ . Відповідно зменшення температури можна за рахунок зменшення величини l_2 , фактично виключити проникнення тепла в деталь.

Для практичного використання в рівняння введемо час контакту інструменту (шліфувального круга) з деталлю $\tau=l/V_{\text{дет}}$ і після перетворень маємо:

$$\theta = \sigma \cdot t \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V_{\text{дет}}}{\sqrt{2 \cdot t \cdot R_{\text{кр}}}}} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{Q_{\text{уд}}}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{\text{кр}}}}} \quad (3)$$

де σ – умовне напруження різання, Н/м²

$Q_{\text{уд}}$ – питому продуктивність обробки, м²/с

$V_{\text{дет}}$ – швидкість деталі, м/с

t – глибина шліфування, м

$R_{\text{кр}}$ – радіус інструменту (шліфувального круга), м

Згідно з цією умовою вплинути на температуру θ в зоні обробки можна за рахунок зменшення параметрів σ , t , $V_{\text{дет}}$ або зменшення глибини шліфування t за умови $Q_{\text{уд}} = \text{const}$. Зменшення глибини шліфування та збільшення швидкості деталі $V_{\text{дет}}$ буде вимагати багато прохідну обробку.

Вищенаведена формула (3) з визначення максимальної температури справедлива лише при розподіленні тепла тільки в заготовку, а в реальному процесі шліфуванні нагрів відбувається і стружки, і інструменту, при цьому відбувається зменшення температури θ та величини l_2 . Отже, далі розглянемо розподілення тепла, що виділяється під час шліфування і в стружку.

Для врахування вищезазначених умов було запропоновано вести поправочний коефіцієнт, величина якого від 0 до 1. Цей коефіцієнт враховується залежно від умов обробки й визначається зазвичай від експериментальних даних, тобто на основі експериментів визначено, що в тих чи інших умовах кількість тепла більше уходить то в стружку, то в заготовку. Однак використання поправочного коефіцієнта не дозволяє його використовувати в узагальненому вигляді й використовувати при будь-яких умовах.

Було запропоновано аналітичне вирішення цієї задачі з урахуванням руху теплового джерела вздовж адіабатичного стержня в межах товщини шару, що знімається (рис. 2), тобто відбувається перерізання адіабатичного стержня. Швидкість такого пере різання стержня $V_{\text{різ}} = t/\tau$, де τ – час перерізання адіабатичного стержня.

Розрахунки в цьому випадку побудовані на теорії, що тепло, яке виділяється під час шліфування нагріває дві ділянки адіабатичного стержня, які поділені на $l_1 = t$ та l_2 , тобто на ділянку деталі, яка після обробки стає стружкою, та ділянкою, яка описує глибину проникнення тепла. Для подальших розрахунків необхідно визначити час τ_2 необхідний на нагрівання не видаленої частини адіабатичного стержня. Це дозволить визначити частини розподілення тепла в заготовку та стружку.

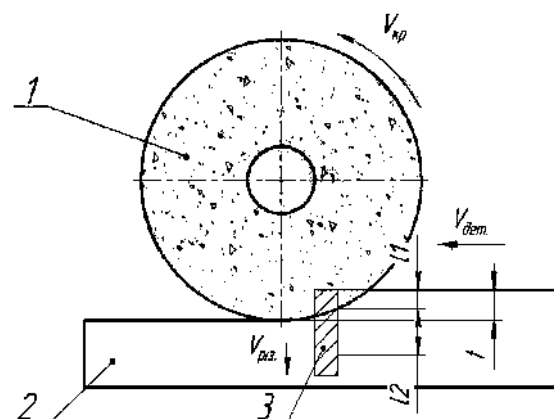


Рис. 2. Схема плоского шліфування при врахуванні розподілу тепла в стружку:
 1 – абразивний круг; 2 – заготовка; 3 – адіабатичний стержень; t – глибина різання (шліфування); l_1 – частина адіабатичного стержня, що видаляється;
 l_2 – частина адіабатичного стержня, що не видаляється

Баланс тепла, яке витрачається на нагрівання двох частин адіабатичного стержня:

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{\text{різ}} \cdot \theta + \frac{\lambda \cdot c \cdot \rho}{\sigma \cdot V_{\text{різ}}} \theta \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = \sigma \cdot V_{\text{різ}} \quad (4)$$

$$\text{де } q = \sigma \cdot V_{\text{різ}} \quad (5)$$

Отже, температура в зоні обробки буде:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \left(1 - e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{\text{різ}}^2}{\lambda} \tau} \cdot e^{\frac{c \cdot \rho}{\sigma} \theta} \right) \quad (6)$$

Визначено, що температура θ безперервно збільшується та асимптотична наближається до максимального значення $\theta_{\text{max}} = \sigma / (c \cdot \rho)$. Отже:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{\text{max}}} \right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{\text{max}}}} = e^{\frac{c \cdot \rho \cdot V_{\text{різ}}^2}{\lambda} \tau} \quad (7)$$

За умови $\tau=0$ вираз $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{\text{max}}} \right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{\text{max}}}} = 1$, тоді $\frac{\theta}{\theta_{\text{max}}} = 0$;

За умови $\tau \rightarrow \infty$ вираз $\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{\text{max}}} \right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{\text{max}}}} = 0$, тоді $\frac{\theta}{\theta_{\text{max}}} = 1$.

Робимо висновок, що при зміні часу τ від 0 до ∞ , співвідношення $\theta / \theta_{\text{max}}$ змінюється в межах від 0 до 1.

Швидкість перерізання адіабатичного стержня інструментом (шліфувальним кругом) визначається:

$$V_{\text{різ}} = V_{\text{дет}} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{\text{кр}}}}, \quad (8)$$

де $R_{\text{кр}}$ – радіус шліфувального круга, м.

Підставляємо у формул (6) та (7) та маємо:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{\text{max}}} \right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{\text{max}}}} = e^{\frac{c \cdot \rho}{\lambda} V_{\text{дет}} \cdot t \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{\text{кр}}}}}, \quad (9)$$

або

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{\text{max}}} \right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{\text{max}}}} = e^{\frac{c \cdot \rho}{\lambda} Q_{\text{уд}} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{\text{кр}}}}}, \quad (10)$$

де $Q_{\text{уд}}$ – питома продуктивність обробки, $\text{м}^2/\text{с}$, $Q_{\text{уд}} = V_{\text{дет}} \cdot t$.

На основі визначених залежностей та на основі проведених розрахунків було визначено, що зі збільшенням глибини шліфування t співвідношення $\theta/\theta_{\max}$ збільшується, асимптотична наближаючись до 1. При цьому глибина шліфування t змінюється в широких межах.

Також зі збільшенням питомої продуктивності обробки $Q_{\text{уд}}$ відбувається збільшення $\theta/\theta_{\max}$ при цьому охоплюється менший діапазон можливої зміни глибини шліфування.

Швидкість деталі $V_{\text{дет}}$ зі збільшенням глибини шліфування значно зменшується, що передбачає використання схеми глибинного шліфування. Схема багатопрохідного шліфування (тоді забезпечується збільшення швидкості деталі $V_{\text{дет}}$) можлива при відносно невеликих значеннях $\theta/\theta_{\max} < 0,2 \dots 0,4$.

Основною умовою зменшення температури шліфування θ є зменшення умовного напруження різання σ за рахунок використання більш прогресивних методів механічної обробки включаючи обробку як абразивними, так і лезвійними ріжучими інструментами. Тому проблему зниження енергоємності механічної обробки слід розглядати основною з погляду зменшення температури різання і підвищення якості та продуктивності обробки.

Висновок. Отже, у роботі визначено, що вплинути на температуру в зоні обробки та продуктивність шліфування можна за допомогою:

- 1) зменшення умовного напруження різання σ ;
- 2) зменшення глибини шліфування t ;
- 3) зменшення швидкості деталі $V_{\text{дет}}$;
- 4) виконання багатопрохідної обробки при збільшених значеннях глибини шліфування t та швидкості деталі $V_{\text{дет}}$;
- 5) збільшення довжини контакту круга із заготовкою, що оброблюється (зниження температури). Наприклад, застосувати схеми плоского торцевого шліфування.

Список використаних джерел

1. Новіков, Ф. В. (2014). *Математичне моделювання та оптимізація процесів металообробки*. ХНЕУ ім. С. Кузнеця.
2. Новіков, Ф., Жовтобрюх, В., Анділахай, А., Новіков, Д., & Полянський, В. (2018). *Сучасні технології та технічні переоснащення підприємств*. ЛІРА.
3. Новіков, Ф. (2007). Підвищення ефективності технології фінішної обробки деталей пар тертя поршневих насосів. У *Фізичні та комп'ютерні технології* (с. 8–20). ХНПК «ФЕД».
4. Новіков, Ф., Жовтобрюх, В., & Шкурупий, В. (2018). *Оптимальні рішення в технології машинобудування*. ЛІРА.

References

1. Novikov, F. V. (2014). *Matematychnе modeliuvannia ta optymizatsiia protsesiv metaloobrobky*. [Mathematical modelling and optimisation of metalworking processes] *Kharkivskiyi Natsionalnyi Ekonomichnyi Universytet imeni S. Kuznetsia - Kharkiv National University of Economics named after S. Kuznets*.
2. Novikov, F., Zhovtobriukh, V., Andilakhai, A., Novikov, D., & Polianskyi, V. (2018). *Suchasni tekhnolohii ta tekhnichni pereosnashchennia pidpriemstv*. [Modern technologies and technical re-equipment of enterprises.] LIRA.
3. Novikov, F. (2007). *Pidvyshchennia efektyvnosti tekhnolohii finishnoi obrobky detalei par terttia porshnevykh nasosiv*. [Improving the efficiency of the technology for finishing parts of piston pump friction pairs.] У *Fizychni ta kompiuterni tekhnolohii* (pp. 8–20). KhNPK «FED»- Physical and computer technologies (pp. 8-20). KHNPК “FED”.
4. Novikov, F., Zhovtobriukh, V., & Shkurupiy, V. (2018). *Optymalni rishennia v tekhnolohii mashynobuduvannia*. [Optimal solutions in mechanical engineering technology.] LIRA.

Отримано 07.01.2025

Oleksiy Vovk

postgraduate

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: aleksey1740vovk@gmail.com**INCREASING THE EFFICIENCY OF GRINDING FLAT SURFACES
BY ADJUSTING THE CUTTING TEMPERATURE**

The grinding process is one of the main types of metal finishing in most factories not only in Ukraine, but also in the world. However, during grinding operations in the processing area, temperatures increase significantly, which cause a number of defects in the finished product. Such defects significantly affect the accuracy, durability of finished products, operational characteristics, etc. To improve the quality of the product, the temperature in the processing area should be reduced. In order to understand how to influence the temperature in the grinding zone and at the same time leave high-performance processing, it is necessary to identify the dependence that will help to identify those parameters that have an impact on the temperature.

The main method of this publication is to conduct the theoretical analysis of the distribution of heat between the chip and the surface of the part being ground (in case of flat grinding) and, on this basis, to determine methods of reducing the temperature in the processing zone. Such theoretical information should be able to be used in practice.

Most of the scientific works that today consider the grinding process, including the grinding of flat surfaces, are based on simplified relationships that do not take into account the depth of heat penetration into the surface layer of the workpiece and do not take into account the distribution of heat between the chip and the workpiece.

The paper presents dependencies based on the heat conduction equation, which do not take into account heat distribution and take it into account. With the help of dependencies without taking into account heat distribution, it is known that the temperature is affected by both the grinding depth and the speed of the part. Dependencies taking into account heat separation into chips and workpiece are closer to the real grinding process, and these dependencies made it possible to conclude that the main condition for reducing the grinding temperature is the reduction of conditional cutting stress due to the use of more advanced machining methods.

The information presented in the article is of an overview nature.

Keywords: grinding; flat surface; reduction of cutting temperature; improvement of surface quality; heat conduction equation.

Fig.: 2. References: 5.

РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2025-1(39)-125-133

УДК 347.78.03

**Олексій Васильович Самойленко¹, Анастасія Юріївна Беляєва²,
Юрій Петрович Бородій³**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ, Україна)
E-mail: o.samoilenko@kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0403-1707>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ, Україна)
E-mail: a.bieliaieva@kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1696-8687>

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології виробництва літальних апаратів
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ, Україна)
E-mail: borodii.yurii@lil.kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8050-0379>

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ЗАСВІДЧЕННЯ ОБ'ЄКТІВ ПРАВА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ

Стаття є оглядово-інформаційною. У статті розглянуто проблему захисту права інтелектуальної власності науковців та викладачів на їхні наукові розробки, особливо у випадках, коли традиційні методи захисту є недостатніми. Основну увагу приділено захисту особистих немайнових прав на службові, замовні твори та проміжні наукові результати.

Дослідження проводиться на перетині права інтелектуальної власності та інформаційних технологій. Метою роботи є аналіз та порівняння цифрових сервісів Google Workspace та КЕП Дія. Підпис з погляду їхньої ефективності в підтвердженні авторства.

Результати дослідження допоможуть науковцям та викладачам у виборі оптимального способу захисту своїх прав інтелектуальної власності, а також сприятимуть розвитку цифрових інструментів для альтернативного захисту інтелектуальної власності. У роботі використано методи порівняльного аналізу, а ключовими результатами є порівняльна таблиця характеристик сервісів та висновки щодо їхніх переваг і недоліків.

Отримані результати можуть бути використані для вибору оптимального сервісу захисту прав інтелектуальної власності у різних ситуаціях.

Ключові слова: право інтелектуальної власності; особисте немайнове право; твір; кваліфікований електронний підпис; авторство; пріоритет; обсяг охорони; керування доступом; Google Workspace; електронний підпис; хмарний сервіс.

Рис.: 3. Табл.: 3. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Науковці та викладачі часто стикаються з необхідністю підтвердити своє авторство на наукові розробки, особливо коли традиційні методи захисту авторських прав (публікація, державна реєстрація) не підходять. Це важливо для запобігання плагіату та інших порушень академічної доброчесності [9, ст. 42 ч. 4], коли результати досліджень можуть бути привласнені іншими особами.

Щоб захистити свої права інтелектуальної власності, науковець та викладач повинні мати чіткий механізм підтвердження авторства на твір ще до моменту його передачі іншим особам. Цей механізм має бути достатньо надійним, щоб дозволити безперешкодно довести авторство в будь-якій інстанції, зокрема в університетських комісіях з етики, у разі виникнення суперечок щодо авторства.

У випадку службових творів [11, ст. 429] або творів, створених на замовлення [11, ст. 430], автор стикається з низкою обмежень щодо захисту своїх авторських прав. По-перше, майнові права на такий твір зазвичай належать роботодавцю або замовнику, що значно ускладнює, а інколи й унеможливорює самостійну реєстрацію авторського права автором. По-друге, навіть якщо реєстрація авторського права відбувається, свідоцтво про

реєстрацію не містить повного тексту твору, а лише формальні дані про нього. Це робить такий документ недостатньо доказовим у разі виникнення спорів щодо авторства. Крім того, проміжні наукові результати, які ще не набули завершеної форми [5, ст. 9 ч. 1], зокрема гіпотези, розрахунки або результати експериментів, не підпадають під стандартні процедури захисту авторських прав, оскільки не є готовими до публікації. Таким чином, автори таких творів опиняються у вразливому становищі, оскільки існуючі механізми захисту авторських прав не забезпечують їм достатнього рівня правового захисту. Тому виникає гостра потреба в розробці спеціальних механізмів засвідчення авторства, які б дозволили авторам швидко та ефективно захистити свої права на інтелектуальну власність.

Вочевидь, йдеться про засвідчення лише *особистих немайнових прав* [11, ст. 423] на об'єкт права інтелектуальної власності. Проте цього достатньо в контексті наукової етики та академічної доброчесності.

Необхідною умовою правового захисту інтелектуальної власності є наявність незалежного підтвердження авторства, дати створення та обсягу прав. Таке підтвердження може бути надане лише суб'єктом, який не пов'язаний з автором або іншими зацікавленими сторонами і не має мотивів для фальсифікації даних.

У роботі [10] було показано, що для вирішення зазначених питань найбільш прийнятним є використання двох цифрових сервісів:

- набір хмарних інструментів та сервісів Google Workspace [12];
- кваліфікований електронний підпис від вебпорталу та додатка Дія (далі – КЕП Дія.Підпис) [2].

Надалі терміни «об'єкт права інтелектуальної власності» (скорочено – ОПІВ), «твір», «примірник твору» та «документ» у контексті цього дослідження слід вважати синонімами.

Мета досліджень - дослідити переваги та недоліки способів засвідчення прав на об'єкти права інтелектуальної власності за допомогою цифрових сервісів Google Workspace та КЕП Дія.Підпис та узагальнити їхні порівняльні характеристики.

Результати досліджень. У контексті цього дослідження йдеться про *електронну форму* представлення примірника об'єкта права інтелектуальної власності.

Наприклад, коли йдеться про реєстрацію авторського права на твір [7], примірник твору може бути представлений в таких форматах: PDF, MP3, AVI, MKV, MP4, JPEG, TIFF, PNG.

Однак це стосується лише завершених творів, які готові до державної реєстрації.

У випадку проміжних результатів формат представлення примірника об'єкта права інтелектуальної власності може бути будь-який, наприклад DWG, XLS, DOC тощо.

Сервіс КЕП Дія.Підпис працює лише з локальними файлами. Натомість сервіс Google Workspace працює як з локальними файлами, завантаженими на Google Drive, так і з документами, створеними на Google Drive за допомогою онлайн-процесорів типу Google Docs, Google Sheets або інших (у тому числі й сторонніх) додатках. Другий тип (створення документів на Google Drive) є основним.

Правова охорона будь-якого об'єкта права інтелектуальної власності базується на одночасному виконанні таких умов її надання:

- Авторство: особа автора (авторів) твору повинна бути відомою.
- Пріоритет: має бути відома дата, не пізніше якої створено твір.
- Обсяг охорони: має бути визначеним зміст тієї інформації, яка потребує охорони правом інтелектуальної власності.

Тобто:

$$[\text{Охорона ОПІВ}] = [\text{Авторство}] \wedge [\text{Пріоритет}] \wedge [\text{Обсяг охорони}].$$

Тому означені сервіси слід досліджувати передусім за *тріадою ознак «авторство – пріоритет – обсяг охорони»*, а також за деякими іншими ознаками, які важливі для практичного застосування цих сервісів. Повний перелік ознак у контексті дослідження такий:

- автономність;
- достовірність пріоритету;
- достовірність обсягу правової охорони;
- достовірність особи автора твору;
- доступність для суб'єкта права інтелектуальної власності;
- збереження персональної інформації;
- керування доступом до об'єкта права інтелектуальної власності;
- моніторинг змін об'єкта права інтелектуальної власності;
- робота в реальному часі.

Попередньо ці характеристики слід вважати такими, що мають однакові вагові коефіцієнти, та позитивними за замовчанням. Пропонується оцінювати їх за 3-бальною шкалою, де 1 бал – найгірші показники, 3 бали – найкращі показники. Результати оцінки та порівняння сервісів слід звести в єдину табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння сервісів засвідчення права інтелектуальної власності

Ознаки та характеристики	Google Workspace	КЕП Дія.Підпис
Автономність (робота без мережі Internet)	1	2
Достовірність пріоритету	3	3
Достовірність обсягу правової охорони	3	3
Достовірність особи автора твору	2	3
Доступність для автора	3	2
Збереження персональної інформації	3	1
Керування доступом до ОПІВ	3	1
Моніторинг змін об'єкта права ІВ	3	1
Робота в реальному часі	3	1

Сервіси Google Workspace та КЕП Дія.Підпис є безкоштовними, але не рівнозначними з огляду *доступності*.

Для використання Google Workspace не потрібно жодних обов'язкових формальностей, цим сервісом може користуватись будь-яка особа за умови наявності доступу до мережі Internet.

Натомість КЕП Дія.Підпис передбачає жорстку ідентифікацію користувача за допомогою відповідних засобів:

- система Bank ID Національного банку України;
- файловий ключ;
- апаратний ключ;
- зчитування біометричних документів за допомогою NFC тощо.

Тобто для використання КЕП Дія.Підпис автор має бути принаймні клієнтом одного з провідних українських банків, а система повинна мати оцифроване зображення обличчя автора. Зазвичай ці засоби не потребують додаткових витрат, однак, вони пов'язані з певними формальностями та незручностями.

Звідси напряму впливає й *достовірність особи автора твору*. Якщо при використанні КЕП Дія.Підпис особу автора фактично підтверджує держава Україна, то у випадку використання Google Workspace підтвердження особи автора потребує від автора твору додаткових кроків неюридичного характеру за запитом третьої особи, наприклад:

- демонстрація третім особам процедури входу в профіль Google Workspace та відкриття відповідного документа;

– додавання коментарів або внесення демонстраційних змін до документа, відкритому для третіх осіб у режимі перегляду тощо.

При оцінці *достовірності пріоритету* обидва сервіси мають високу достовірність, але із застереженнями.

Сервіс КЕП Дія.Підпис використовує стандартний київський час (UTC+2) з точністю до секунди (рис. 1).

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 11:49:39 09.01.2025

Назва файлу з підписом: samoilenko - article 2023.pdf.p7s
Розмір файлу з підписом: 3.0 МБ

Назва файлу без підпису: samoilenko - article 2023.pdf
Розмір файлу без підпису: 3.0 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: Самойленко Олексій Васильович
П.І.Б.: Самойленко Олексій Васильович
Країна: Україна
РНОКПП: XXXXXXXXXX

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 13:10:57 20.02.2023

Сертифікат виданий: "Дія". Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг

Серійний номер: 3ED5083160DBC59B040000000B002500F704CF00

Тип носія особистого ключа: ЗНКІ криптомодуль ІІТ Гряда-301

Серійний номер носія особистого ключа: Не визначено

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Кваліфікований

Тип контейнера: Підпис та дані в одному файлі (CADES enveloped)

Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CADES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2024.11.25 13:00

Рис. 1. Протокол перевірки КЕП Дія.Підпис

Джерело: розроблено авторами.

Натомість сервіс Google Workspace як правило, адаптується до часового поясу користувача. Це означає, що коли користувач входить у свій обліковий запис Google Workspace, сервіси автоматично налаштовуються на той час, який встановлено на його пристрої. Якщо користувач перебуває в Україні, то Google Workspace налаштовується на стандартний київський час.

Однак у деяких рідкісних випадках може виникнути сумнівна ситуація. Наприклад, два автори незалежно один від одного створили аналогічні об'єкти інтелектуальної власності й вирішили зафіксувати особисте немайнове право досліджуваними способами. Один з авторів перебуває в Києві та зафіксував своє право за допомогою КЕП Дія.Підпис о 19 годині за київським часом. Другий автор перебуває у Лондоні та зафіксував свої права за місцевим часом о 18 годині того ж дня. Формально другий автор володіє пріоритетом перед першим автором, хоча фізично другий автор зафіксував своє право на 1 годину пізніше.

Сервіс Google Workspace фіксує час, а отже, і пріоритет, з точністю до хвилини, проте на практиці це не є скільки-небудь значущою обставиною.

Обидва сервіси – Google Workspace та КЕП Дія.Підпис – характеризуються рівними (але не однаковими) можливостями в засвідченні *достовірності обсягу правової охорони* твору, адже передбачають легке представлення твору перед зацікавленими особами, повністю або частково.

Підсумовуючи достовірність умов надання правової охорони (табл. 2), можна зробити попередній висновок, що КЕП Дія.Підпис має вищу достовірність за всіма умовами.

Таблиця 2 – Достовірність умов надання правової охорони

Умови надання правової охорони	Google Workspace	КЕП Дія.Підпис
Авторство	Умовно достовірне (потребує додаткових заходів з підтвердження)	Достовірне (підтверджено державним органом)
Пріоритет	Умовно достовірний (використовується час того часового поясу, у якому перебуває користувач, з точністю до хвилини)	Достовірний (використовується стандартний київський час із точністю до секунди)
Обсяг охорони	Достовірний (фіксуються фінальна версія документа та історія його змін)	Достовірний (фіксується лише фінальна версія документа)

З огляду *автономності* обидва сервіси не є повністю незалежними від доступу до мережі Internet.

Для сервісу Google Workspace доступ до мережі Internet є не просто потребою, а відображає саму суть сервісу. Усі дії з документами відбуваються через Internet (крім деякої можливості роботи з документом offline, але цю опцію слід підключати).

Однак сервіс КЕП Дія.Підпис потребує обов'язкового доступу до мережі Internet лише при підписанні [4] та перевірці [3] підписаного документа. Зберігання, передача документа третім особам тощо відбувається аналогічно, як з будь-яким іншим файлом (наприклад, на фізичних носіях або за допомогою локальної мережі).

З огляду *керування доступом* до об'єкта права інтелектуальної власності сервіси Google Workspace та КЕП Дія.Підпис абсолютно нерівнозначні.

Сервіс КЕП Дія.Підпис не передбачає керування доступом до файлу з ОПІВ, який уже переданий на розгляд третім особам.

Натомість сервіс Google Workspace надає широкі можливості для керування доступом, які можна звести до деякої матриці (табл. 3).

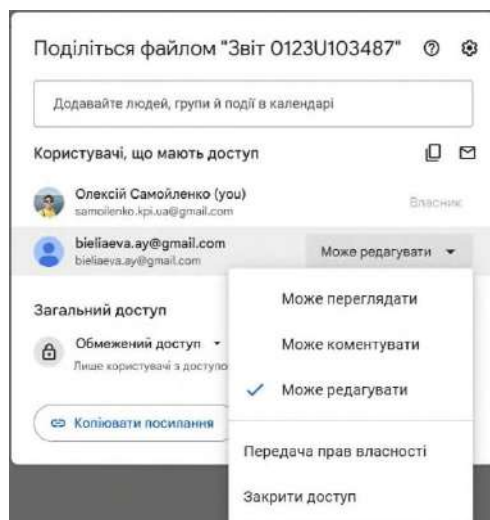
Таблиця 3 – Варіанти керування доступом до ОПІВ у сервісі Google Workspace

1. Типи користувачів	2. Рівні доступу
1.1. Користувачі, що мають доступ 1.2. Загальний доступ	2.1. Не мають доступу 2.2. Можуть переглядати 2.3. Можуть коментувати 2.4. Можуть редагувати

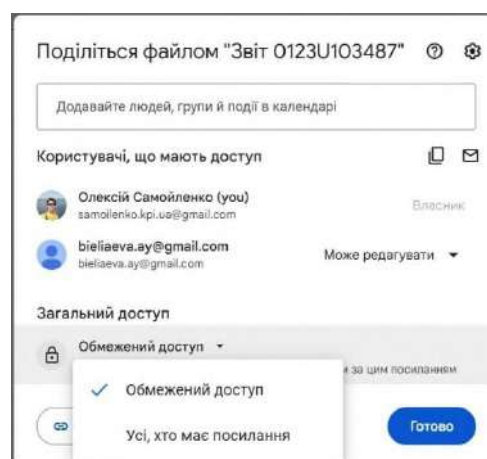
Якщо передбачається обмежена кількість користувачів документа (рис. 2, а), то визначені користувачі додаються за їхніми електронними адресами, причому рівень доступу для кожного користувача встановлюється окремо.

Загальний доступ (рис. 2, б) може бути закритий для всіх (позначено як "Обмежений доступ") або відкритий для тих, у кого є посилання. При цьому користувачі, які мають посилання і які не зазначені як "Користувачі, що мають доступ", мають аналогічні рівні доступу до документа (рис. 2, в).

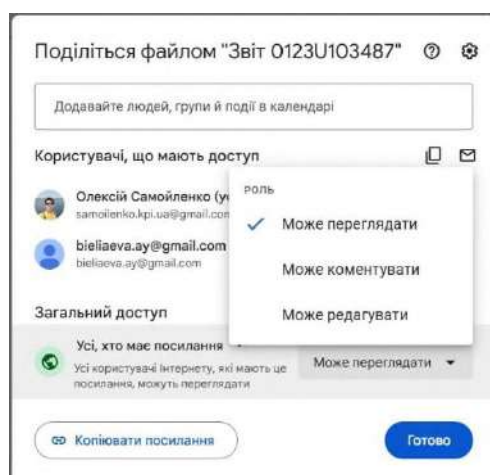
Також сервіс Google Workspace надає можливість заборонити користувачеві не тільки друк документа, але і його копіювання через буфер обміну (рис. 2, г).



а



б



в



г

Рис. 2. Доступ до документів у системі Google Workspace
Джерело: розроблено авторами.

Різні способи доступу до документа накладають різні способи використання документа третіми особами.

Так, при використанні сервісу КЕП Дія.Підпис підписаний файл документа передається третім особам, при цьому автор втрачає вплив на цей документ.

А при використанні сервісу Google Workspace третім особам передається не файл з документом, а *посилання на документ* в системі Google Workspace. При цьому за автором залишається можливість керування доступом: долучати або вилучати інших осіб, змінювати їхні можливості роботи з файлом документа тощо. Все це може відбуватись в реальному часі. А після завершення роботи з файлом документа автор може взагалі закрити до нього доступ.

Моніторинг змін твору особливо актуальний у випадку, коли над твором працювали декілька співавторів і треба встановити їхній внесок.

Сервіс Google Workspace дає широкі можливості з представлення не тільки дати й часу змін твору, але й автора та суті цих змін (рис. 3).

Натомість сервіс КЕП Дія.Підпис працює лише з остаточною версією твору.

Сервіс Google Workspace допускає виконання цих дій *в реальному часі*, що підвищує достовірність ідентифікації автора.

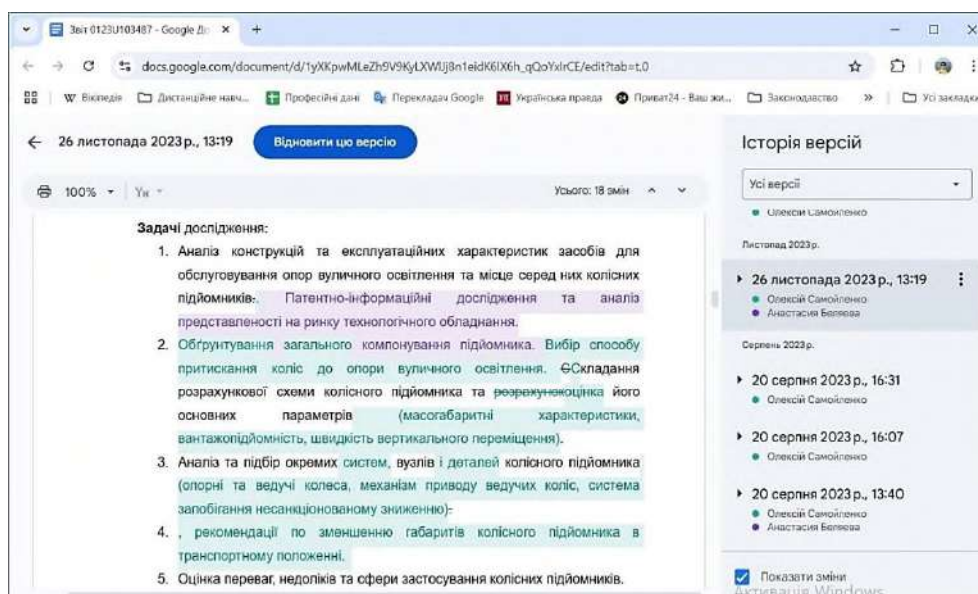


Рис. 3. Історія версій документа в Google Workspace

Джерело: розроблено авторами.

При оцінці збереження конфіденційної інформації КЕП Дія.Підпис однозначно програє, оскільки протокол (рис. 1) перевірки містить реєстраційний номер облікової картки платника податків (далі – РНОКПП) підписанта.

Згідно із Положенням про реєстрацію фізичних осіб у Державному реєстрі фізичних осіб – платників податків, РНОКПП належить до персональних даних фізичної особи [6, Додаток № 1], за якими та може бути однозначно ідентифікована. Ці дані не підлягають збиранню, зберіганню, використанню та поширенню без згоди фізичної особи (крім випадків, визначених законодавством) [8, ст. 11].

Тобто, при передачі примірника об'єкта права інтелектуальної власності, підписаного КЕП, для подальшого розгляду, конфіденційна інформація потрапляє до третіх осіб, наприклад, членів комісії з етики ЗВО.

Водночас використання сервісу Google Workspace передбачає видачу третім особам дозованої інформації, яка не містить персональних даних автора. Навіть якщо мова йде про використання корпоративного профілю [1]. Щоправда, інформація стосовно особи автора є декларативною і має бути додатково підтверджена у визначений зацікавленими особами спосіб.

Висновки. За сукупністю ознак та характеристик жоден з розглянутих сервісів для засвідчення об'єктів права інтелектуальної власності не має вирішальної переваги перед іншим.

У плані достовірності умов надання правової охорони однозначну перевагу має сервіс КЕП Дія.Підпис. Однак, сервіс Google Workspace надає широкі можливості з адміністрування примірника твору, що в ряді випадків може бути вирішальним фактором.

Тому вибір між способами засвідчення особистого немайнового права на об'єкти права інтелектуальної власності має лежати в практичній площині діяльності автора залежно від конкретних обставин.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів

Під час написання цього матеріалу автори використовували *Google Gemini 1.5 Flash* з метою стислого узагальнення результатів попередніх досліджень в оглядовій частині статті, а також підготовки анотації статті.

Після використання цього інструменту автори переглянули та відредагували зміст і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Sikorsky-distance. (n.d.). Google Workspace for Education. <https://www.sikorsky-distance.org/g-suite-for-education/>
2. ДІА. (б.д.). Дія. Підпис. https://ca.dia.gov.ua/faq_dia_id.
3. *Перевірити підпис*. (б. д.). Центральний засвідчувальний орган. <https://czo.gov.ua/verify>.
4. *Підписати документ*. (б. д.). Центральний засвідчувальний орган. <https://czo.gov.ua/sign>.
5. Про авторське право і суміжні права, Закон України № 2811-IX (2024) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2811-20#Text>.
6. Про затвердження Положення про реєстрацію фізичних осіб у Державному реєстрі фізичних осіб - платників податків, Наказ Міністерства фінансів України № 822 (2024) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1306-17#Text>.
7. Про затвердження Порядку державної реєстрації авторського права і договорів, які стосуються майнових прав на твір, Наказ Всі міжнародні документи № 11319 (2023). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1760-23#Text>.
8. Про інформацію, Закон України № 2657-XII (2024) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2657-12#Text>.
9. Про освіту, Закон України № 2145-VIII (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19#Text>.
10. Самойленко, О. В., Холявік, О. В., Бородій, Ю. П. (2023). Засвідчення особистого немайнового права на твір без державної реєстрації авторського права. *Удосконалення законодавства та механізму реалізації захисту прав інтелектуальної власності в умовах післявоєнного відновлення України. Секція 6. «Управління проєктами. Перспективи розвитку проєктного та нейромеджменту, інформаційних технологій управління, технологій створення та використання об'єктів права інтелектуальної власності, трансферу технологій»* : V Міжнар. науково-практ. інтернет-конф. (Київ - Дніпро, 23–24 берез. 2023 р.) (с. 91-94). Науково-дослідний інститут інтелектуальної власності НАПрН України. <https://drive.google.com/file/d/1NIDzvEaZp1SkqX85uTI8MNRQcUev3Aml/view>.
11. *Цивільний кодекс України*. (б.д.). Офіційний вебпортал парламенту України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text>.
12. *Що таке Google Workspace?* (n.d.). Google Workspace. <https://workspace.google.com/intl/uk/resources/what-is-workspace/>

References

1. Google Workspace for Education. (n.d.). <https://www.sikorsky-distance.org/g-suite-for-education>.
2. Diia. Pidpys [Diia. Signature]. (n.d.). https://ca.dia.gov.ua/faq_dia_id.
3. *Pereviryty pidpys [Check the signature]*. (n.d.). Tsentralnyi zasvidchuvalnyi orhan – Central Certification Authority. <https://czo.gov.ua/verify>.
4. *Pidpysaty dokument [Sign the document]*. (n.d.). Tsentralnyi zasvidchuvalnyi orhan – Central Certification Authority. <https://czo.gov.ua/sign>
5. Pro avtorske pravo i sumizhni prava [On Copyright and Related Rights], Law of Ukraine No. 2811-IX (2022). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2811-20>.
6. Pro zatverdzhennia Polozhennia pro reiestratsiiu fizychnykh osib u Derzhavnomu reiestri fizychnykh osib - platnykiv podatkov [On Approval of the Regulation on Registration of Individuals in the State Register of Individuals - Taxpayers], Order No. 822 (2017). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1306-17>.
7. Pro zatverdzhennia Poriadku derzhavnoi reiestratsii avtorskoho prava i dohovoriv, yaki stosuutsia mainovykh prav na tvir [On Approval of the Procedure for State Registration of Copyright and Agreements Concerning Property Rights to a Work], Order No. 11319 (2023). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1760-23>
8. Pro informatsiiu [On Information], Law of Ukraine No. 2657-XII. (1992). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2657-12>.
9. Pro osvitu [On Education, Law of Ukraine No. 2145-VIII]. (2017). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19>

10. Samoilenko, O.V., Kholiavik, O.V., & Borodii, Yu.P. (2023). Zasvidchennia osobystoho nemainovoho prava na tvir bez derzhavnoi reiestratsii avtorskoho prava [Certification of a personal non-property right to a work without state registration of copyright]. *Upravlinnia proiektamy. perspektyvy rozvytku proiektynoho ta neiromenedzhmentu, informatsiinykh tekhnolohii upravlinnia, tekhnolohii stvorennia ta vykorystannia obiektiv prava intelektualnoi vlasnosti, transfer tekhnolohii – Project management. Prospects for development of project and neuromanagement, information management technologies, technologies for the creation and use of intellectual property rights intellectual property, technology transfer : Proceedings of V International Scientific and Practical Conference* (pp. 91–94). NDI IV NAPrN Ukrainy, Interservis. <https://drive.google.com/file/d/1NIDzvEAzP1SkqX85uTI8MNRQcUev3AmI/view>.

11. Tsyvilnyi kodeks Ukrainy, Kodeks Ukrainy № 435-IV [Civil Code of Ukraine, Code of Ukraine No. 435-IV]. (2003). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15>

12. Shcho take Google Workspace? [What is Google Workspace?]. (n.d.). <https://workspace.google.com/intl/uk/resources/what-is-workspace/>

Отримано 12.01.25

UDC 347.78.03

Oleksii Samoilenko¹, Anastasiia Bieliaieva², Yurii Borodii³

¹PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Machine Design National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: o.samoilenko@kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0403-1707>

² PhD in Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Machine Design National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: a.bieliaieva@kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1696-8687>

³PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Dept. of Aircraft Production Technology National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: borodii.yurii@kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8050-0379>

USING DIGITAL TECHNOLOGIES TO CERTIFY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

The article is an overview and information. Researchers and educators often face the challenge of protecting their authorship rights in scholarly endeavors, particularly when traditional methods such as publication or formal registration prove inadequate. The focus is on the protection of personal moral rights in commissioned works, contract projects, and especially in preliminary research.

This study lies at the intersection of intellectual property law and information technology, addressing the need for specialized authorship verification to efficiently uphold creative rights. This research aims to bolster intellectual property rights protection for academics, prevent plagiarism, and foster academic integrity.

The study analyzes the strengths and weaknesses of Google Workspace and CEP Diia.Pidpys (Diia.Signature) in validating intellectual property rights, providing a comparative analysis. It will benchmark these digital tools for their effectiveness in confirming authorship.

The results will help academics to choose optimal methods of intellectual property protection and to improve digital tools for this purpose.

Employing comparative analysis, the study evaluates Google Workspace and CEP Diia.Pidpys (Diia.Signature) across various criteria, culminating in a ranked comparison table and a summary of their respective advantages and disadvantages.

The outcomes are designed to guide researchers and educators in choosing suitable intellectual property protection strategies, demonstrating the study's objectives and the practical application of its findings in diverse scenarios.

Keywords: intellectual property right; moral right; work; qualified electronic signature; authorship; priority; scope of protection; access control; Google Workspace; electronic signature; cloud service/

Fig.: 3. Table: 3. References: 12.

**Олена Григорівна Жданова¹, Людмила Віталіївна Рибачук²,
Вероніка Сергіївна Рябчун³, Тарас Васильович Малярчук⁴**

¹ кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: zhdanova.elena@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8787-846X>

ResearcherID: K-1193-2016. Scopus Author ID: 57208339441

² кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: rybachuk.liudmyla@lil.kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7652-587X>

ResearcherID: AAE-7644-2019. Scopus Author ID: 57226545637

³ студентка кафедри інформаційних систем та технологій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: nikakyiv696@gmail.com

⁴ студент кафедри інформаційних систем та технологій

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: tarasmalarcuk8@gmail.com

ЗАДАЧА МАКСИМІЗАЦІЇ ЗВАЖЕНОЇ КІЛЬКОСТІ ОБ'ЄКТІВ, ОБСТЕЖЕНИХ ДРОНОМ

У сучасних умовах розвитку безпілотних технологій актуальними є задачі планування траєкторій дронів з максимальним охопленням об'єктів. Задача полягає в побудові прямої, яка перетинає найбільш значущі об'єкти на площині. Через неперервність простору прямих і дискретність розташування цілей застосовано дискретизацію. Метою роботи є розробка та порівняльний аналіз трьох підходів: жадібного алгоритму, часткового перебору секторів і евристичного методу. Проведено математичне обґрунтування, визначено критерії охоплення об'єктів, оцінено складність і ефективність методів. Результати показали: жадібний алгоритм демонструє найменший час виконання, але є менш точним; евристичний забезпечує баланс між точністю й швидкістю; частковий перебір – найточніший, але найповільніший. Задача може бути використана як компонент у складніших моделях планування місії дронів.

Ключові слова: дрон; БПЛА; максимізація кількості обстежених об'єктів; планування траєкторії; дискретизація; комбінаторна оптимізація; жадібний алгоритм; частковий перебір; евристичний метод.

Рис.: 10. Табл.: 3. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Сучасні військові та цивільні операції дедалі частіше вимагають ефективного застосування дронів для обстеження або ураження цільових об'єктів, витрачаючи при цьому мінімальні ресурси. У військовій сфері це передусім питання оперативного планування й зменшення ризиків, а в цивільному контексті може стосуватися моніторингу великих територій — наприклад, для охорони кордонів, пошуково-рятувальних операцій чи аграрного сектору. В обох випадках завдання максимальної кількості обстежених дронами об'єктів має високу практичну цінність. Водночас проблема ускладнюється обмеженістю часу, ресурсів (наприклад, запасів енергії дрона) та геометричними аспектами його руху.

Постановка проблеми. Задача відноситься до класу важкорозв'язуваних оптимізаційних проблем, які неможливо розв'язати за прийнятний час методами перебору, коли розмірність задачі сягає сотень чи тисяч об'єктів. Тож виникає потреба в розробленні ефективних алгоритмічних підходів, здатних за обмежений час знаходити якісні (оптимальні або наближені до них) розв'язки. Дослідження ефективності різних алгоритмів, а також порівняння їхньої продуктивності, точності та масштабованості дозволять обрати найкращий метод під конкретні вимоги, зокрема: швидкодію, ступінь точності, критичність завдання тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема оптимізації траєкторії дронів у контексті максимального зваженого покриття об'єктів отримала значну увагу в сучасних наукових дослідженнях. Останні дослідження у сфері планування маршрутів для безпілотних літальних апаратів (БПЛА) спрямовані на розв'язання задачі максимізації покриття території при мінімальних витратах ресурсів.

У роботі [1] представлено огляд методів планування покриття для роботів, виділяючи ефективні стратегії маршрутизації для розвідки та інспекції великих територій. У [2] досліджено методи пошуку та переслідування у мобільній робототехніці, що можуть бути застосовані до задач дронного моніторингу. У дослідженні [3] розглядалися підходи до забезпечення безперервного покриття бездротового зв'язку за допомогою автономних БПЛА, що має значення для управління та передачі даних у реальному часі.

У роботі [4] запропоновано огляд сучасних технологій дронного моніторингу навколишнього середовища, підкреслюючи можливості безпілотників для збору просторових даних. У [5] досліджено проблему одночасного визначення місцеположення та картографування (SLAM), яка є важливою складовою автономної навігації БПЛА.

У дослідженні [6] розглянуто проблему вибору датчиків для завдань спостереження, що є ключовим аспектом для оптимального використання БПЛА в місіях збору даних. У [7] автори запропонували алгоритми семплінгового планування руху, які можуть бути ефективно застосовані до задач оптимального маршруту дрона. У [8] детально розглянуто алгоритми планування, що використовуються для автономного руху безпілотних систем.

У роботі [9] автори застосували змішане-цілочислове лінійне програмування для планування траєкторії літальних апаратів з урахуванням уникнення зіткнень, що є важливим аспектом оптимального маршруту БПЛА. У [10] досліджено використання інтелектуальних роїв БПЛА для спільного пошуку та відстеження об'єктів, що може підвищити ефективність спостереження.

У статті [11] автори запропонували методи планування маршруту БПЛА з урахуванням невизначеностей для максимального збору інформації, що особливо актуально у задачах спостереження, а у [12] оптимізували траєкторії для одночасного відстеження кількох рухомих цілей за допомогою БПЛА.

У дослідженні [13] представлено методи для планування місій БПЛА, використовуючи метаевристичні алгоритми, що дозволяє адаптивно оптимізувати маршрут дрона. У [14] запропоновано алгоритми для оптимізації траєкторій БПЛА у задачах нагляду, що мають практичну значущість для військових і цивільних застосувань. У [15] розглянуто оптимізацію траєкторії дронів для максимального покриття у місіях спостереження, застосовуючи комбінаторні методи оптимізації.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз літератури свідчить про значну увагу до проблеми оптимізації траєкторії дронів. Незважаючи на значний обсяг досліджень, залишається відкритим питання оптимального планування маршрутів БПЛА для максимізації кількості обстежених об'єктів за обмеженими ресурсами (час польоту, енергія). Існуючі роботи переважно зосереджені або на забезпеченні суцільного покриття, або на оптимізації відстеження рухомих цілей, однак не враховують комбінацію цих аспектів для ефективного використання дронів у реальних умовах. Таким чином, у цій статті пропонується підхід до оптимізації маршрутів БПЛА, спрямований на максимізацію кількості обстежених об'єктів.

Мета роботи полягає в розробленні та порівняльному аналізі алгоритмів, призначених для задачі визначення траєкторії польоту за якої досягає максимуму кількості обстежених об'єктів.

Постановка задачі

Змістовна постановка задачі. Маємо прямокутну ділянку з координатами вершин: $(0,0)$, $(0,Y)$, (X,Y) , $(X,0)$. На цій ділянці розміщено n об'єктів, кожен з яких має форму кола радіуса r . Для об'єкта i ($i = 1, \dots, n$) відомі координати центру кола (x_i, y_i) та вага (важливість) w_i .

Дрон починає свій маршрут з деякої (довільної) точки границі ділянки і летить по прямій. Необхідно знайти такі точку старту та напрямок польоту дрона, щоб зважена кількість об'єктів, над якими він пролетить, була максимальною.

Передбачається, що польотного ресурсу дрону вистачає для виконання поставленої місії. Ця задача є окремим елементом у складі більш комплексних моделей планування місій дронів. Зокрема, у задачах, де необхідно враховувати обмежений запас енергії, можливість зміни курсу під час польоту, пріоритетність певних зон огляду, а також наявність перешкод. Досліджувана задача може використовуватись як базовий блок для побудови ефективних маршрутів.

Приклад задачі. Є прямокутна ділянка з координатами вершин $(0,0)$, $(0,17)$, $(18,17)$, $(18,0)$. На цій ділянці розміщено 12 об'єктів, кожен з яких має форму кола радіусу 0,6 (рис. 1). Для об'єкту i ($i = 1, \dots, 12$) відомі координати центру кола (x_i, y_i) та вага (важливість) w_i (табл. 1).

Дрон починає свій маршрут з деякої (довільної) точки границі ділянки і летить по прямій. Необхідно знайти такі точку старту та напрямок польоту дрона, щоб зважена кількість об'єктів, над якими він пролетить, була максимальною.

Таблиця 1 – Об'єкти, їхні координати і ваги

Об'єкт №	Координати (x_i, y_i)	Вага w_i	Об'єкт №	Координати (x_i, y_i)	Вага w_i	Об'єкт №	Координати (x_i, y_i)	Вага w_i
1	(2, 15)	7	5	(2, 9)	6	9	(5, 3)	3
2	(7, 14)	5	6	(8, 9)	7	10	(9, 5)	2
3	(14, 15)	8	7	(16, 10)	9	11	(13, 5)	2
4	(11, 12)	5	8	(2, 5)	9	12	(15, 2)	4

Джерело: розроблено авторами.

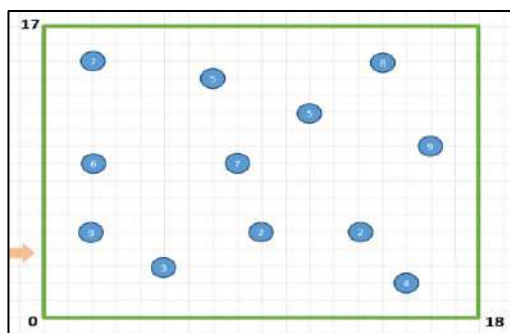
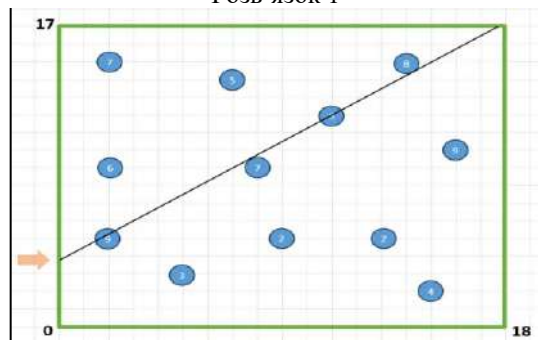


Рис. 1. Візуалізація об'єктів для постановки задачі

Джерело: розроблено авторами.

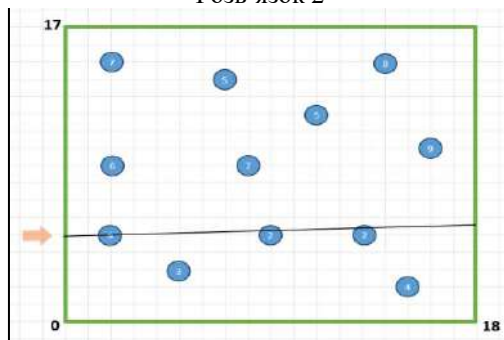
Приклади розв'язків наведені на рис. 2.

Розв'язок 1



Зважена кількість об'єктів, над якими пролетів дрон: $9+7+5+8=29$

Розв'язок 2



Зважена кількість об'єктів, над якими пролетів дрон: $9+2+2=13$

Рис. 2. Можливі траєкторії польоту та відповідні зважені кількості об'єктів

Джерело: розроблено авторами.

Математична постановка задачі. Для формалізації задачі побудови оптимальної траєкторії руху дрона необхідно ввести відповідні математичні позначення та сформулювати умови, які визначають шуканий розв'язок.

Допоміжні математичні відомості. Метою розв'язання задачі є знаходження параметрів прямої, яка описується рівнянням виду $y = kx + b$, де k — кутовий коефіцієнт, що визначає нахил прямої відносно осі абсцис, а b — ордината точки перетину прямої з віссю y . При $k > 0$ пряма піднімається праворуч, при $k < 0$ — опускається праворуч, а при $k = 0$ — є горизонтальною.

В основу математичної моделі задачі покладено умову перетину прямої $y = kx + b$ та кола радіуса r з центром в точці (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, n$, яке задається формулою $(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = r^2$.

Підставивши рівняння прямої у рівняння кола, отримаємо вираз:

$$(x - x_i)^2 + (kx + b - y_i)^2 = r^2, \quad i = 1, \dots, n.$$

Аби пряма перетинала коло або доторкалась до нього, дискримінант D цього квадратного рівняння повинен бути не від'ємним:

$$D = (-2x_i + 2kb - 2ky_i)^2 - 4(1 + k^2)(x_i^2 + b^2 - 2by_i + y_i^2 - r^2) \geq 0, \quad i = 1, \dots, n.$$

Вхідні дані. X — довжина ділянки; Y — ширина ділянки; n — кількість об'єктів; r — радіус об'єктів; x_i — координата центру об'єкту i по осі x ($i = 1, \dots, n$); y_i — координата центру об'єкту i по осі y ($i = 1, \dots, n$); w_i — вага об'єкту i ($i = 1, \dots, n$).

Змінні. Необхідно знайти: b — координати точки перетину прямої лінії, вздовж якої летить дрон, з віссю y ; k — кутовий коефіцієнт прямої. Відповідно до рівняння прямої введемо такі змінні:

$$d_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } D \geq 0 \\ 0, & \text{якщо інакше} \end{cases} \quad (i = 1, \dots, n).$$

Обмеження

$$b \leq 0, \quad (1)$$

$$k \leq 0, \quad (2)$$

$$d_i = 0 \text{ або } d_i = 1 \quad (i = 1, \dots, n). \quad (3)$$

Цільова функція. Оскільки треба знайти таку траєкторію руху дрона аби зважена кількість об'єктів, над якими він пролетить, була максимальною, то цільова функція буде мати вигляд:

$$W = \sum_{i=1}^n w_i d_i \rightarrow \max.$$

Алгоритми розв'язання задачі

Значення параметрів k та b , що визначають пряму $y = kx + b$, є неперервними величинами. Однак з огляду на специфіку поставленої задачі — необхідність максимізації сумарної ваги дискретної множини об'єктів (кіл) — існує можливість певним чином дискретизувати простір допустимих розв'язків. Це дозволяє перейти від задачі неперервної оптимізації до задачі дискретної оптимізації, що робить доступними для застосування класичні методи дискретної оптимізації та комбінаторні алгоритми.

Для розв'язання задачі можуть бути застосовані такі підходи.

Алгоритми перебору — повного або часткового. Методи, що передбачають систематичний перебір певної дискретної множини можливих розв'язків. Методи повного пере-

бору знаходять оптимальний розв'язок. Якщо перебір є неповним, то методи не гарантують глобальної оптимальності, але зазвичай забезпечують прийнятну точність та стабільність. Головний недолік – висока складність перебору при збільшенні кількості об'єктів.

Жадібні (Greedy) алгоритми. Цей підхід ґрунтується на поетапному виборі локально оптимального розв'язку без повернення назад. Перевага жадібних алгоритмів полягає в їх простоті й низькій обчислювальній складності, що забезпечує високу швидкість обчислень. Недоліком є неможливість гарантувати глобальний оптимум.

Евристичні методи. Це клас методів оптимізації, які базуються на певних гіпотезах, припущеннях, інтуїтивних ідеях чи практичних спостереженнях. Їх застосовують переважно у випадках, коли задача має високу складність (наприклад, NP-складні задачі), і отримання точного розв'язку за розумний час практично неможливе. На відміну від точних алгоритмів, евристики не гарантують отримання оптимального розв'язку, але дозволяють швидко знаходити прийнятні, наближені розв'язки.

У цій роботі розроблено алгоритми таких методів:

- жадібного (Greedy);
- часткового перебору (далі — будемо називати його Partial Search);
- евристичного (далі — Floating Line).

Розробка жадібного алгоритму. Жадібний алгоритм — це стратегія, яка на кожному кроці обирає локально оптимальний вибір, очікуючи, що така послідовність рішень приведе до глобального оптимального розв'язку [16]. Має низьку обчислювальну складність, однак не гарантує глобально оптимального маршруту.

Ідея розробленого алгоритму полягає в рекурсивному поділі вхідного прямокутника на менші прямокутники із подальшим вибором “найбільш зважених” областей для проведення через них прямої.

Для спрощення пояснення припустимо, що всі об'єкти (кола) мають однакову вагу. На першому кроці прямокутна область ділиться на чотири однакові підобласті. З них обираються дві з найбільшою кількістю об'єктів. Припустимо, що області із найбільшою вагою на 1-й ітерації це 2-га і 4-та чверті. На 2-й ітерації ми ділимо кожну з цих областей на 4 менші та з'єднуємо центри цих поділених прямокутників прямою і знову обираємо із 8-ми новоутворених прямокутників два з найбільшими вагами. Далі кожна з цих під-областей також ділиться на чотири, після чого проводиться пряма через центри двох найбільш «зважених» новоутворених прямокутників. Рекурсивний поділ продовжується, поки діагональ новоствореного прямокутника перевищує діаметр r кола. Після досягнення цієї межі повертається остання збудована пряма – вона і є наближеним розв'язком.

Псевдокод жадібного алгоритму

```

1  Вхід
    $X$  — довжина ділянки
    $Y$  — ширина ділянки
    $n$  — кількість об'єктів
    $r$  — радіус об'єктів
    $x_i, y_i$  — координати центру об'єкту ( $i = 1, \dots, n$ )
    $w_i$  — вага об'єкту  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ )
2  Вихід
    $k_{best}, b_{best}, W_{best}$  //Параметри прямої
3  Функція GreedySplit(прямокутник):
4      if діагональ прямокутника  $\leq r$ 
5          then повернути  $W, k, b$  останньої знайденої прямої
6      else
7          Поділити rectangle на 4 рівні підпрямокутники
8          Для кожного підпрямокутника обчислити суму ваг кіл, що в ньому знаходяться

```

```

9      Обрати два підпрямокутника з найбільшими сумарними вагами
10     Побудувати пряму через центри цих двох підпрямокутників (знайти відповідні  $k, b, W$ )
11     Сформувати новий прямокутник (можливі два варіанти: обрані центри є кінцями діагоналі прямокутника або кінцями його серединної лінії)
12     Рекурсивно викликати GreedySplit(новий прямокутник)
13     end if
14      $x_{min} = 0, y_{min} = 0, x_{max} = X, y_{max} = Y$  // параметри вхідного прямокутника
15     Викликати GreedySplit(вхідний прямокутник)
16     Повернути  $W_{best}, k_{best}, b_{best}$ 

```

На кожному кроці алгоритму виконується поділ області на 4 частини і обчислення сумарної ваги кіл у кожній із них. Оскільки для кожної підобласті здійснюється перевірка до n кіл, то складність одного рівня рекурсії становить $O(n)$.

Після кожного поділу лінійні розміри обраної області зменшуються вдвічі, а площа — у чотири рази. Рекурсія триває доти, поки діагональ поточної області D_l (l — номер рівня рекурсії) не стане меншою або рівною діаметру r кола.

Початкова діагональ: $D_0 = \sqrt{X^2 + Y^2} \sim M$ (де M — розмір області). На l -му рівні рекурсії діагональ дорівнює $D_l = \frac{D_0}{2^l}$. Рекурсія завершується, коли $D_l \leq r$, тобто:

$$\frac{D_0}{2^l} \leq r \Rightarrow 2^l \geq \frac{D_0}{r} \Rightarrow l \geq \log_2 \left(\frac{D_0}{r} \right).$$

Отже, максимальна глибина рекурсії: становить $O(\log M)$, де $M = \frac{D_0}{r}$ — відношення початкової діагоналі до діаметра кола.

Оскільки на кожному рівні виконується $O(n)$ операцій, а таких рівнів не більше ніж $O(\log M)$, то загальна часова складність становить $O(n \log M)$.

Розробка алгоритму часткового перебору. Алгоритм повного перебору (Bruteforce) є найпростішим способом пошуку оптимального розв'язку шляхом послідовного перебору всіх можливих варіантів [16]. Як було зазначено вище, для того, щоб застосовувати класичні методи дискретної оптимізації до задачі визначення оптимальних параметрів k та b , необхідно певним чином дискретизувати простір допустимих розв'язків. Враховуючи, що параметри прямої є неперервними величинами, повний перебір усіх можливих варіантів є неможливим через нескінченну кількість допустимих розв'язків. Проте в розглянутій задачі оптимальна пряма, яка максимізує сумарну вагу кіл, завжди проходить через певні ключові точки — точки дотику або перетину з колами. Це дозволяє значно скоротити множину аналізованих варіантів і перейти до задачі дискретної оптимізації, перебираючи лише прямі, визначені такими точками.

В основу розробленого алгоритму покладено ідею методу часткового перебору, який у цьому випадку не повною мірою перебирає усі можливі розв'язки (надалі цей алгоритм будемо називати Partial Search). Хоча звуження множини допустимих прямих дозволяє суттєво зменшити обчислювальну складність, існує ймовірність, що знайдений таким чином розв'язок не буде абсолютним оптимумом, а лише наближеним до нього.

Сектором у контексті вирішення цієї задачі будемо називати нескінченну область між двома прямими, що є дотичними до двох кіл.

Нехай маємо два кола, координатами центрів яких є (x_i, y_i) та (x_j, y_j) , $1 \leq i, j \leq n$, $i \neq j$. Рівняння зовнішніх дотичних до цих кіл такі:

$$y = kx + b_1, \quad y = kx + b_2,$$

де $k = \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}$ — кутовий коефіцієнт цих дотичних (які є паралельними);

$b_1 = y_i + r n_y - k(x_i + r n_x)$ — вільний член першої дотичної;

$b_2 = y_i - rn_y - k(x_i - rn_x)$ – вільний член другої дотичної;

$n_x = -\frac{y_j - y_i}{D}, n_y = \frac{x_j - x_i}{D}$ – координати одиничного вектора, ортогонального до дотичних;

$d = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$ – відстань між центрами кіл.

Нижче наведено приклад того, як виглядає сектор та всі можливі унікальні випадки належності кола до сектора (рис. 3).

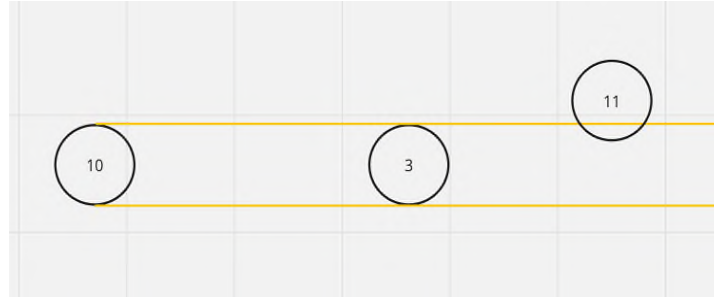


Рис. 3. Приклад створення сектору алгоритмом Partial Search

Джерело: розроблено авторами.

У цьому прикладі область між двома жовтими лініями — це сектор. Будемо казати, що коло належить сектору, якщо воно перетинає або дотикається хоча б до однієї прямої, що формує сектор.

Алгоритм перебору для цієї задачі базується на систематичному переборі секторів, утворених усіма можливими парами кіл (об'єктів). Кожна пара визначає сектор, обмежений двома прямими — дотичними або такими, що перетинають відповідні кола. Для кожного такого сектора обчислюється сумарна вага об'єктів, що перетинаються з однією з двох прямих сектора. Серед них обирається та пряма, яка забезпечує максимальне покриття за вагою. Якщо знайдене значення перевищує поточний максимум, рекордний розв'язок оновлюється.

Отже, нам треба мати можливість визначити, чи перетинається певне коло із заданою прямою. Розглянемо умови, коли пряма дотикається чи перетинає коло.

Рівняння кола має вигляд $(x - p)^2 + (y - q)^2 = r^2$, де (p, q) — координати центра кола, r — радіус. Рівняння прямої: $y = kx + b$. Щоб визначити, чи перетинається коло з прямою, підставимо рівняння прямої в рівняння кола й отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} (x - p)^2 + (y - q)^2 = r^2, \\ y = kx + b. \end{cases}$$

Підставляючи рівняння прямої в рівняння кола, отримаємо квадратне рівняння відносно x :

$$(x - p)^2 + (kx + b - q)^2 = r^2,$$

або, після перетворень:

$$(1 + k^2)x^2 + [2k(b - q) - 2p]x + [p^2 + (b - q)^2 - r^2] = 0.$$

Позначимо коефіцієнти цього рівняння як:

$$A = 1 + k^2, B = 2k(b - q) - 2p, C = p^2 + (b - q)^2 - r^2, D = B^2 - 4AC.$$

Якщо дискримінант D більший за нуль, то маємо два розв'язки — пряма перетинає коло в точках (x_1, y_1) , (x_2, y_2) :

$$x_1 = \frac{-B + \sqrt{D}}{2A}, y_1 = kx_1 + b, x_2 = \frac{-B - \sqrt{D}}{2A}, y_2 = kx_2 + b.$$

Якщо дискримінант рівний нулю, то маємо один розв'язок – пряма дотикається до кола:

$$x_1 = \frac{-B}{2A}, y_1 = kx_1 + b.$$

Псевдокод алгоритму *Partial Search*

```

1  Вхід
    $X$  — довжина ділянки
    $Y$  — ширина ділянки
    $n$  — кількість об'єктів
    $r$  — радіус об'єктів
    $x_i, y_i$  — координати центру об'єкту ( $i = 1, \dots, n$ )
    $w_i$  — вага об'єкту  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ )
2  Вихід
    $k_{best}, b_{best}, W_{best}$  //Рекордний розв'язок, рекорд
3  Відсортувати кола у порядку незростання їх ваг  $w$ 
4   $W_{best} := 0$ 
5  for Кожної пари кіл  $i, j$ , де  $1 \leq i < j \leq n$ 
6      Побудувати сектор, що формується двома прямими
7      Визначити параметри першої прямої:  $k_1, b_1$ 
8      Визначити параметри другої прямої:  $k_2, b_2$ 
9       $W_1 := 0$  // сума ваг кіл, які перетинаються першою прямою сектора
10      $W_2 := 0$  // сума ваг кіл, які перетинаються другою прямою сектора
11     for  $i := 1$  to  $n$  //Цикл по об'єктам
12         if (перша пряма перетинає коло  $i$ )
13             then  $W_1 := W_1 + w_i$ 
14         if (друга пряма перетинає коло  $i$ )
15             then  $W_2 := W_2 + w_i$ 
16     end for
17      $W_{cur} := \max\{W_1, W_2\}$ 
18      $(k_{cur}, b_{cur}) :=$  параметри прямої, що відповідають  $W_{cur}$ 
        //Перевизначення рекордного розв'язку
19     if  $W_{cur} > W_{best}$ 
20         then  $W_{best} := W_{cur}, k_{best} := k_{cur}, b_{best} := b_{cur}$ 
21 end for
22 Повернути  $W_{best}, k_{best}, b_{best}$ 

```

Алгоритм перебирає пари кіл, отже, базова складність перебору пар становить $O(n^2)$. Для кожної пари кіл алгоритм аналізує решту n кіл для визначення належності сектору, що в сукупності дає складність $O(n^3)$.

Розробка евристичного алгоритму *Floating line*. Ідея алгоритму полягає у переборі множини прямих, що проходять через центральну точку ділянки. Починаючи з горизонтальної прямої (кут нахилу 0°), пряма поступово повертається на деякий невеликий кут (Δ) до повного оберту на 180° . На кожному кроці алгоритм обчислює параметри нової прямої; перевіряє, з якими колами пряма перетинається або до яких дотикається; обчислює сумарну вагу цих кіл; запам'ятовує поточний рекордний розв'язок.

Розглянемо коло із центром у точці $O(X/2, Y/2)$. Пряма задається рівнянням $y = kx + b$, будемо вважати, що вона проходить через точку O . Початково $k = 0, b = Y/2$. Ідея алгоритму полягає у повороті цієї прямої на деякий кут $\Delta > 0$, доки пряма не розвернеться на 180° та перевіріці перетину кожного з кіл цією прямою.

Початково кут прямої рівний 0° . Для того, щоб отримати нову пряму після повороту, потрібно до кута повороту прямої додати певну величину, яку позначимо як Δ . Рівняння

нової прямої $y = k'x + b'$. Отже, новий коефіцієнт $k' = \operatorname{tg}(\alpha + \Delta)$, де α — попередній кут нахилу. Точка, через яку завжди проходить пряма — це точка O . Отже, $b' = \frac{Y}{2} - k' \cdot \frac{X}{2}$. Тоді рівняння нової прямої набуде вигляду:

$$y = k'x + b' = \operatorname{tg}(\alpha + \Delta) \cdot x + \frac{Y}{2} - \operatorname{tg}(\alpha + \Delta) \cdot \frac{X}{2}.$$

Псевдокод алгоритму Floating line

```

1  Вхід
    $X$  — довжина ділянки.
    $Y$  — ширина ділянки
    $n$  — кількість об'єктів.
    $r$  — радіус об'єктів.
    $x_i, y_i$  — координати центру об'єкту ( $i = 1, \dots, n$ ).
    $w_i$  — вага об'єкту  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ).
    $\Delta$  — крок повороту прямої //Параметр алгоритму
2  Вихід
    $k_{best}, b_{best}, W_{best}$  //Рекордний розв'язок, рекорд
3   $J_{max} := \frac{180}{\Delta}$  //Кількість ітерацій
4   $W_{best} := 0, k_{best} := 0, b_{best} := 0$ 
5   $\alpha := 0, k := 0, b := \frac{Y}{2}$ 
6   $j = 0$ 
7  while ( $j \leq J_{max}$ )
8       $k' := \operatorname{tg}(\alpha + \Delta), b' := \frac{Y}{2} - k' \cdot \frac{X}{2}$  //Параметри прямої
9       $W_{cur} := 0$ 
10     for  $i := 1$  to  $n$  //Цикл по об'єктам
11         if (пряма перетинає коло  $i$ )
12             then  $W_{cur} := W_{cur} + w_i$ 
13     end for
14     //Перевизначення рекордного розв'язку
15     if  $W_{cur} > W_{best}$ 
16         then  $W_{best} := W_{cur}, k_{best} := k', b_{best} := b'$ 
17     //Перехід до аналізу наступної прямої
18      $i := i + 1,$ 
19      $\alpha := \alpha + \Delta, k := \operatorname{tg}(\alpha), b := \frac{Y}{2} - k \cdot \frac{X}{2}$ 
20 end while
21 Повернути  $W_{best}, k_{best}, b_{best}$ 

```

У алгоритмі Floating line пряма повертається від кута $\alpha = 0^\circ$ до $\alpha = 180^\circ$ з фіксованим кроком Δ (у градусах). Отже, кількість ітерацій, які виконає алгоритм:

$$J_{max} = \frac{180^\circ}{\Delta}.$$

При зменшенні Δ , значення J_{max} зростає обернено пропорційно: якщо $\Delta = 1^\circ$ — 180 ітерацій; якщо $\Delta = 0,1^\circ$ — 1800 ітерацій; якщо $\Delta = 0,01^\circ$ — 18000 ітерацій.

На кожній ітерації перевіряється, чи перетинає задана пряма кожне з n кіл. Ці перевірки — лінійні по n , тобто одна ітерація має складність: $O(n)$. З урахуванням $J_{max} = \frac{180^\circ}{\Delta}$, маємо загальну складність $O\left(\frac{n}{\Delta}\right)$.

Цей метод є евристичним методом пошуку розв'язку (не гарантує знаходження оптимуму) і може ефективно використовуватись як швидкий наближений метод.

Усі три методи мають відносно помірні вимоги до пам'яті. Жадібний алгоритм потребує додаткової пам'яті для зберігання об'єктів у кожній із рекурсивно створених підобластей, а також має витрати на стек викликів. У гіршому випадку його просторова складність становить $O(n \log M)$. Floating Line має просторову складність $O(n)$, оскільки на кожному кроці перевіряє всі об'єкти, не створюючи додаткових структур. Partial Search використовує $O(n^2)$ пам'яті для зберігання пар об'єктів і результатів перевірки належності до прямих.

Дослідження розроблених алгоритмів

Класифікація задач. Точність та ефективність алгоритмів для вирішення задачі залежить від наступних параметрів: n — кількість кіл; X — абсциса площини; Y — ордината площини; R — радіус усіх кіл; circles — масив усіх кіл.

Приклад розв'язання задачі розмірності $n = 10$. Задана прямокутна ділянка розмірності 30×30 з колами радіусом 2 та згенеровано 10 кіл з такими координатами центру та вагами: 5,6,30; 11,15,10; 17,23,40; 6,27,5; 14,3,7; 13,8,13; 20,20,20; 26,4,15; 8,19,17; 23,6,13. Отримані результати наведені в табл. 2 та на рис. 4.

Таблиця 2 – Результат розв'язання задачі розмірності $n = 10$

Алгоритм	Рівняння прямої	Вага	Час виконання
Floating line	$y = 3,92316x - 43,84734$	60	0,05876
Partial Search	$y = 1,416676x + 2,38478$	80	0,00121
Greedy	$y = 1,5x + 0,46875$	80	0

Джерело: розроблено авторами.

Як можна побачити з результатів, жадібний алгоритм та Partial Search знайшли найкращий результат розв'язку і при цьому виконались за дуже малий час. Час роботи жадібного алгоритму настільки малий, що навіть не відслідковувався. Floating line показав гірший результат та більше затраченого часу на пошук розв'язку.

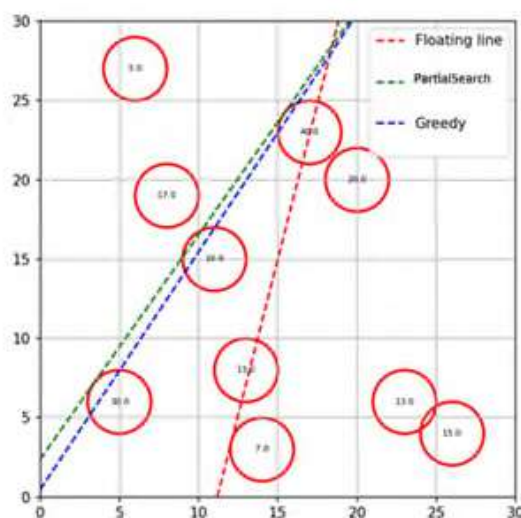


Рис. 4. Результат розв'язання задачі розмірності $n = 10$

Джерело: розроблено авторами.

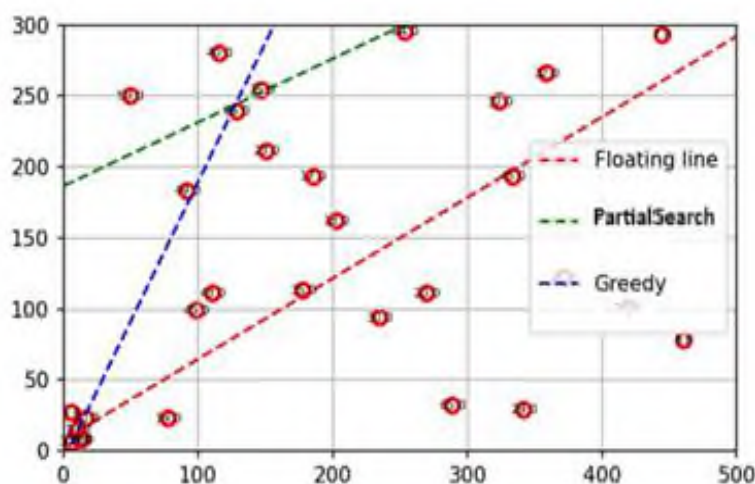
Приклад розв'язання задачі розмірності $n = 30$. Задана прямокутна ділянка розмірності 500×300 , 30 кіл з $r = 5$ та такими координатами центрів та вагами відповідно: 6,6,30; 1,15,10; 17,23,40; 6,27,5; 14,8,7; 13,8,13; 270,111,20; 147,254,35; 186,193,17; 203,162,13; 372,122,25; 99,99,45; 334,193,45; 254,295,84; 342,29,29; 92,183,49; 129,239,58; 78,23,19; 289,32,65; 111,111,43; 151,211,23; 445,293,7; 116,280,40; 420,100,50; 461,78,8; 324,246,32; 359,266,32; 50,250,50; 178,113,35; 235,94,30. Отримані результати наведені в табл. 3 та на рис. 5.

Таблиця 3 – Результат розв'язання задачі розмірності $n = 30$

Алгоритм	Рівняння прямої	Вага	Час виконання
Floating line	$y = 0,56808x + 7,98023$	160	0,22228
Partial Search	$y = 0,448x + 186,68683$	204	0,00301
Greedy	$y = 1,96x - 6,5625$	227	0,00251

Джерело: розроблено авторами.

При $n = 30$ найкращі результати показав жадібний алгоритм та витратив на виконання найменшу кількість часу. Partial Search показав середній результат та гірший час виконання. Алгоритм Floating line показав найгірші показники як за часом виконання, так і за значенням цільової функції.

Рис. 5. Результат розв'язання задачі розмірності $n = 30$

Джерело: розроблено авторами.

Результати експериментів. Метою планування та проведення експериментів є аналіз алгоритмів, а саме дослідження впливу параметрів алгоритмів на їх ефективність. Аналіз відбувався за такими пунктами: 1) вплив параметрів алгоритмів на результат; 2) вплив умов задачі на алгоритми; 3) порівняння алгоритмів за часом та точністю.

Експеримент 1. Дослідження впливу параметру Δ на результати роботи алгоритму Floating line. Тільки алгоритм Floating line має параметр (крок зміни кута Δ , на який обертається пряма). Нехай $0,01 \leq \Delta \leq 0,1$, крок зміни Δ дорівнює 0,01. Результат експерименту представлено на рис. 6.

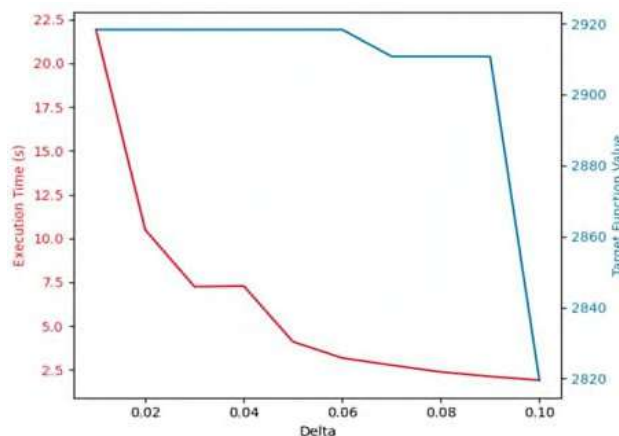


Рис. 6. Результат експерименту 1

Джерело: розроблено авторами.

При зміні кута Δ змінюються час виконання та точність. Чим більше Δ , тим менше різних варіантів прямої треба перевірити, тому при збільшенні кута повороту, час виконання зменшується. Чим менший крок повороту, тим більша ймовірність знайти найкращий результат, тому при зменшенні Δ збільшується точність.

Експеримент 2. Порівняння експериментальної трудомісткості алгоритмів, визначення впливу розмірності задачі на час роботи алгоритмів. Усі алгоритми досліджувались за часовою складністю.

Greedy алгоритм. Результат виконання алгоритму Greedy при $1 \leq n \leq 1000$ представлено на рис. 7.

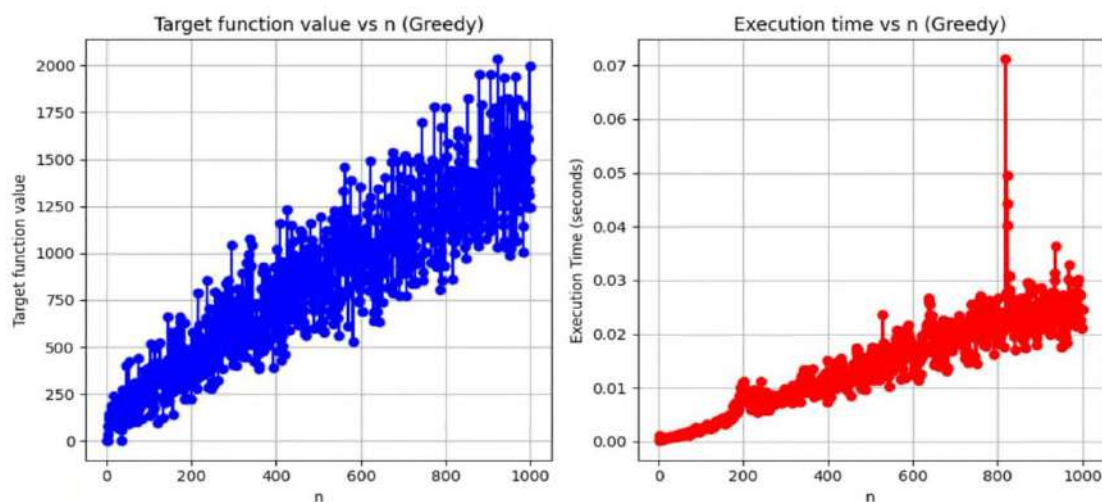


Рис. 7. Результат експерименту 2 (алгоритм Greedy)

Джерело: розроблено авторами.

Як можна побачити з графіків, при збільшенні кількості кіл, час роботи алгоритму зростає лінійно, що й відповідає теоретичній складності $O(n)$.

Partial Search. Результат виконання алгоритму Partial Search при $1 \leq n \leq 1000$ подано на рис. 8. Час виконання зростає нелінійно, що відповідає теоретичній складності.

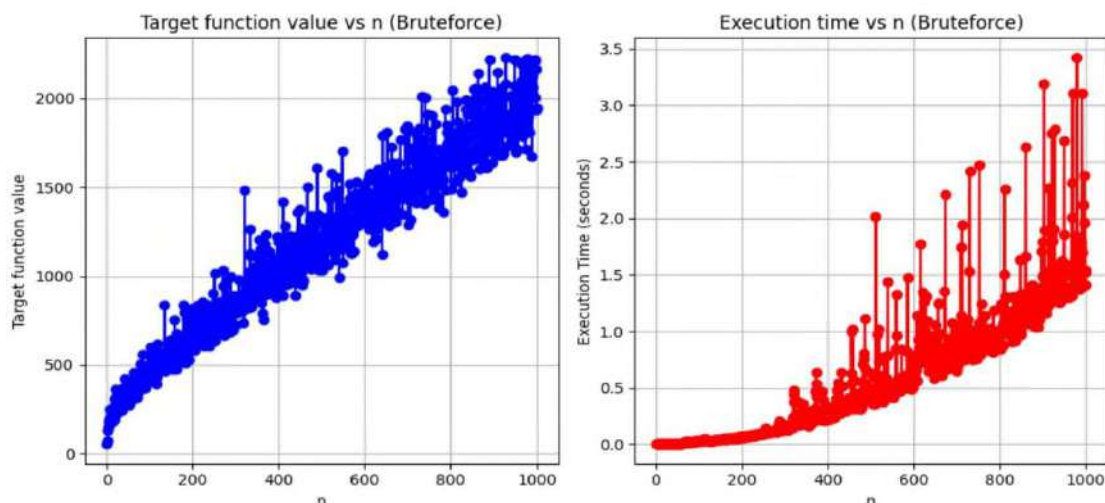


Рис. 8. Результат експерименту 2 (алгоритм Partial Search)

Джерело: розроблено авторами.

Floating line. Результат виконання алгоритму Floating line при $1 \leq n \leq 1000$ подано на рис. 9. Час виконання зростає лінійно, що відповідає теоретичній складності.

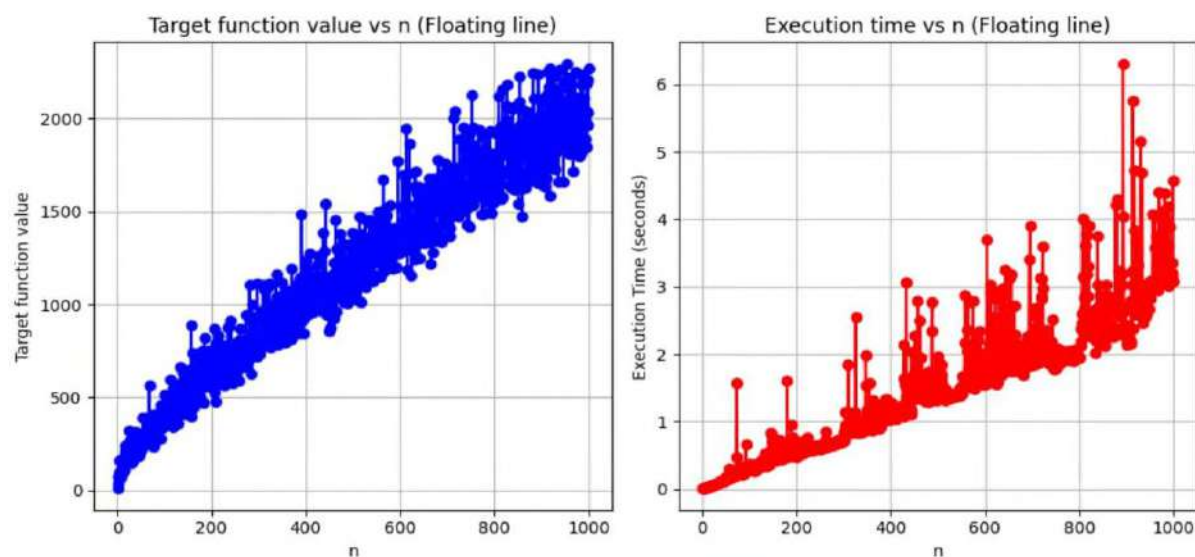


Рис. 9. Результат експерименту 2 (алгоритм Floating line)

Джерело: розроблено авторами.

Експеримент 3. Порівняльний аналіз ефективності розроблених алгоритмів (визначення впливу розмірності задачі на точність алгоритмів). Нехай $800 \leq n \leq 1000$, кількість задач, які генеруються для кожного n дорівнює 30. Отриманий результат представлено на рис. 10.



Рис. 10. Результат порівняння алгоритмів за точністю

Джерело: розроблено авторами.

Як можна побачити з результатів, найкращі результати показують алгоритми Floating line та Partial Search — середня похибка 3-8 % (відхилення від найкращого знайденого). Жадібний алгоритм показав найгірші результати та має середню похибку в 22-39 %.

Вплив конфігурації розташування об'єктів на ефективність алгоритмів

Слід зазначити, що різні конфігурації розташування об'єктів по-різному впливають на ефективність алгоритмів.

Жадібний алгоритм. Є ефективним у випадку рівномірного або кластеризованого розташування об'єктів, особливо коли в щільніших зонах концентруються об'єкти з вищою вагою; якщо «зважена маса» локалізована в певній ділянці, то алгоритм швидко зійдеться до цієї області. Демонструє нижчу ефективність у випадках нерівномірного розподілу, коли важливі об'єкти розкидані по всій вихідній прямокутній ділянці, у ситуаціях, коли оптимальна пряма проходить через слабо виражену зону, алгоритм може її «не побачити» через локальний характер прийняття рішень.

Алгоритм Floating Line. Показує хороші результати при центрально симетричних або кругових конфігураціях розташування об'єктів, коли найбільш вигідна траєкторія проходить поблизу центру області, у таких випадках існує висока ймовірність її знаходження. Менш ефективний при асиметричних або крайових розташуваннях, коли оптимальна пряма проходить далеко від центра — тоді алгоритм із фіксованим центром обертання може не охопити цільову зону.

Алгоритм Partial Search. Ефективність цього методу не залежить від конфігурації розташування об'єктів, оскільки перебираються всі пари кіл. Таким чином, гарантовано будуть розглянуті всі ключові дотичні прямі.

Висновки. Для розв'язання поставленої задачі максимізації сумарної ваги об'єктів, які які обстежуються дроном, було розроблено три алгоритми: жадібний, часткового перебору (Partial Search) та евристичного (Floating line). Основною складністю при пошуку траєкторії руху прямої була неможливість аналітичного отримання точного розв'язку та оцінювання абсолютної точності розв'язків, що отримуються.

Жадібний алгоритм характеризується вибором локально оптимального розв'язку на кожному кроці, що суттєво знижує час обчислення, однак зумовлює значну похибку розв'язку порівняно з іншими методами. Особливо відчутною є його неточність у задачах малої розмірності. Цей алгоритм ефективний на великих наборах даних, які хаотично розподілені по площі.

Перевагою жадібного алгоритму є висока швидкість виконання, яка дозволяє отримати приблизну оцінку оптимального розв'язку за мінімальний час. Зокрема, під час експериментального дослідження було виявлено, що жадібний алгоритм працює в одному із випадків у 640 разів швидше, ніж алгоритм Partial Search.

Алгоритм Partial Search заснований на переборі скінченної множини прямих, утворених точками дотику або перетину кіл між собою. Це значно скорочує кількість варіантів порівняно з повним перебором усіх можливих прямих, проте не гарантує знаходження абсолютного оптимуму. Перевагою цього алгоритму є стабільність отримуваних розв'язків та відносно висока точність. Водночас суттєвим недоліком є суттєве зростання часу обчислень при збільшенні кількості об'єктів, що може зробити цей алгоритм малоефективним для великих задач.

Алгоритм Floating Line ґрунтується на дискретному переборі прямих, що проходять через задану фіксовану точку (центр площини). Його ефективність визначається співвідношенням між точністю розв'язку та швидкістю обчислень, яке можна регулювати за допомогою параметра Δ (крок повороту прямої). Перевагою цього алгоритму є його гнучкість та відносно висока точність при помірному часі роботи, особливо коли кола розташовані симетрично навколо центра площини. Однак при зменшенні параметра Δ точність зменшується, але швидкість збільшується, і навпаки. Це дозволяє користувачу підлаштовувати алгоритм під конкретні вимоги точності та часових ресурсів. Можна підвищити ефективність цього алгоритму, розглядаючи декілька варіантів розміщення точки O . Зокрема, одним з напрямків розвитку алгоритму Floating Line є знаходження центру мас (ваг) і обрання цієї точки за центр кола.

Найкращі результати показують алгоритми Floating line та Partial Search — середня похибка 3-8 % (відхилення від найкращого знайденого). Жадібний алгоритм показав найгірші результати та має середню похибку в 22-39 %.

Практичне застосування розроблених алгоритмів залежить від характеристик задачі. Якщо об'єктів багато, а обчислювальні ресурси обмежені, доцільно використовувати жадібний алгоритм, який забезпечує найшвидше отримання результату, хоч і з меншою точністю. У задачах, де важлива висока точність, незалежно від часу виконання, рекомендовано застосовувати метод часткового перебору. Алгоритм Floating Line може виступати як компромісне рішення, оскільки дозволяє регулювати баланс між точністю та швидкістю за допомогою параметра кроку повороту.

Розглянута задача може бути використана як підзадача в межах більш складних задач планування місій дронів, які враховують обмеження на польотний ресурс, можливість зміни напрямку руху, необхідність охоплення заданих пріоритетних зон, а також уникнення перешкод. Такий підхід дозволяє ефективно інтегрувати модуль побудови оптимальної прямої в ширший контекст багатокрокового планування траєкторій.

Список використаних джерел

1. Galceran, E., & Carreras, M. (2013). A survey on coverage path planning for robotics. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12), 1258–1276. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.004>.
2. Chung, T. H., Hollinger, G. A., & Isler, V. (2011). Search and pursuit-evasion in mobile robotics. *Autonomous Robots*, 31(4), 299–316. <https://doi.org/10.1007/s10514-011-9231-8>.
3. Dhillon, S. S., & Smith, J. (2003). Wireless communication coverage using autonomous UAVs. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 39(2), 152–165. <https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1205972>.
4. Hu, J., Zhang, L., & Wang, J. (2020). Drone-based environmental monitoring: An overview of recent developments. *Remote Sensing*, 12(4), 687. <https://doi.org/10.3390/rs12040687>.
5. Stachniss, C., Leonard, J. J., & Thrun, S. (2008). Simultaneous localization and mapping (SLAM): A survey of current trends. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(5), 1050–1067. <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.2005913>.
6. Isler, V., & Bajcsy, R. (2005). The sensor selection problem for surveillance applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 35(4), 639–648. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2005.850150>.
7. Karaman, S., & Frazzoli, E. (2011). Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *International Journal of Robotics Research*, 30(7), 846–894. <https://doi.org/10.1177/0278364911406761>.
8. LaValle, S. M. (2006). Planning algorithms. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546877>.
9. Richards, A., & How, J. P. (2002). Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed-integer linear programming. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 1(1), 221–238. <https://doi.org/10.2514/6.2002-4588>.
10. Lin, L., Wu, Y., & Duan, H. (2018). UAV swarm intelligence for cooperative search and tracking. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 48(3), 891–904. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2017.2671359>.
11. Evers, L., & Farinelli, A. (2019). UAV path planning under uncertainty for maximum information collection. *Journal of Field Robotics*, 36(2), 125–145. <https://doi.org/10.1002/rob.21800>.
12. Penicka, R., Saska, M., & Thomas, J. (2017). UAV surveillance of multiple moving targets using trajectory optimization. *Autonomous Robots*, 41(5), 1061–1078. <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9614-3>.
13. Smith, R. G., & Becker, K. (2017). Real-time UAV mission planning using metaheuristic optimization techniques. *Journal of Aerospace Engineering*, 31(3), 04017085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000875](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000875)

14. Bazgan, C., Hugot, H., & Vanderpooten, D. (2019). Efficient algorithms for optimizing UAV surveillance trajectories. *Operations Research*, 67(4), 952–969. <https://doi.org/10.1287/opre.2019.1887>.
15. Altahir, A. A., & Khalid, N. A. (2021). Drone trajectory optimization for maximum coverage in surveillance missions. *IEEE Access*, 9, 124568–124580. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3088791>.
16. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. R., & Stein, C. (2022). Introduction to algorithms (4th ed.). Massachusetts Institute of Technology. <https://surl.li/ltcqew>.

References

1. Galceran, E., & Carreras, M. (2013). A survey on coverage path planning for robotics. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12), 1258–1276. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.004>.
2. Chung, T. H., Hollinger, G. A., & Isler, V. (2011). Search and pursuit-evasion in mobile robotics. *Autonomous Robots*, 31(4), 299–316. <https://doi.org/10.1007/s10514-011-9231-8>.
3. Dhillon, S. S., & Smith, J. (2003). Wireless communication coverage using autonomous UAVs. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 39(2), 152–165. <https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1205972>.
4. Hu, J., Zhang, L., & Wang, J. (2020). Drone-based environmental monitoring: An overview of recent developments. *Remote Sensing*, 12(4), 687. <https://doi.org/10.3390/rs12040687>.
5. Stachniss, C., Leonard, J. J., & Thrun, S. (2008). Simultaneous localization and mapping (SLAM): A survey of current trends. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(5), 1050–1067. <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.2005913>.
6. Isler, V., & Bajcsy, R. (2005). The sensor selection problem for surveillance applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 35(4), 639–648. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2005.850150>.
7. Karaman, S., & Frazzoli, E. (2011). Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *International Journal of Robotics Research*, 30(7), 846–894. <https://doi.org/10.1177/0278364911406761>.
8. LaValle, S. M. (2006). Planning algorithms. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546877>.
9. Richards, A., & How, J. P. (2002). Aircraft trajectory planning with collision avoidance using mixed-integer linear programming. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 1(1), 221–238. <https://doi.org/10.2514/6.2002-4588>.
10. Lin, L., Wu, Y., & Duan, H. (2018). UAV swarm intelligence for cooperative search and tracking. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 48(3), 891–904. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2017.2671359>.
11. Evers, L., & Farinelli, A. (2019). UAV path planning under uncertainty for maximum information collection. *Journal of Field Robotics*, 36(2), 125–145. <https://doi.org/10.1002/rob.21800>.
12. Penicka, R., Saska, M., & Thomas, J. (2017). UAV surveillance of multiple moving targets using trajectory optimization. *Autonomous Robots*, 41(5), 1061–1078. <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9614-3>.
13. Smith, R. G., & Becker, K. (2017). Real-time UAV mission planning using metaheuristic optimization techniques. *Journal of Aerospace Engineering*, 31(3), 04017085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.000087](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.000087).
14. Bazgan, C., Hugot, H., & Vanderpooten, D. (2019). Efficient algorithms for optimizing UAV surveillance trajectories. *Operations Research*, 67(4), 952–969. <https://doi.org/10.1287/opre.2019.1887>.
15. Altahir, A. A., & Khalid, N. A. (2021). Drone trajectory optimization for maximum coverage in surveillance missions. *IEEE Access*, 9, 124568–124580. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3088791>.
16. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. R., & Stein, C. (2022). Introduction to algorithms (4th ed.). Massachusetts Institute of Technology. <https://surl.li/ltcqew>.

Отримано 20.03.2025

Olena Zhdanova¹, Liudmyla Rybachuk², Veronika Riabchun³, Taras Maliarchuk⁴

¹ PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: zhdanova.elena@hotmail.com. **ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-8787-846X>

ResearcherID: K-1193-2016. **Scopus Author ID:** 57208339441

² PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: rybachuk.liudmyla@iit.kpi.ua. **ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-7652-587X>

ResearcherID: AAE-7644-2019. **Scopus Author ID:** 57226545637

³ Student of the Department of Information Systems and Technologies,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: nikakyiv696@gmail.com

⁴ Student of the Department of Information Systems and Technologies
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: tarasmaliarcuk8@gmail.com

THE PROBLEM OF MAXIMIZING THE WEIGHTED NUMBER OF OBJECTS SURVEYED BY THE DRONE

In the context of rapid advancements in unmanned technologies, the task of efficient drone trajectory planning is gaining particular relevance. This includes, in particular, optimization of a drone's flight path to maximize coverage of target objects. The research is relevant to both civil and military applications of unmanned aerial vehicles (UAVs), including territory monitoring, search and rescue operations, and patrolling.

The problem under consideration consists in maximizing the weighted number of objects that a drone can survey while moving along a straight-line trajectory. Given the discrete distribution of target objects and continuous nature of the parameter space for straight lines, it becomes necessary to apply discretization to use methods of discrete optimization.

The aim of this paper is to develop and compare combinatorial methods for constructing a line that maximizes the total weight of covered objects. Three approaches are analyzed: a greedy algorithm based on recursive subdivision of the area, a partial search method that evaluates sectors formed between objects, and a heuristic algorithm called "Floating Line," which gradually rotates a line around the center of the area using a fixed angular step. The paper provides mathematical justification for the discretization of the space of lines and defines criteria for determining whether an object is covered by the trajectory. The computational complexity of the proposed algorithms is analyzed, and their effectiveness is evaluated experimentally.

Experimental results show that the greedy algorithm offers high computational speed (tens or even hundreds of times faster), but with reduced accuracy. The "Floating Line" algorithm demonstrates a good balance between accuracy and computation time, whereas the partial search method ensures the highest precision and stability, though it is the most resource-intensive. Depending on the accuracy requirements and available computational resources, the user can choose the most appropriate approach. The proposed algorithms are effective tools for improving drone mission planning in practical scenarios.

The problem can serve as a standalone component within more complex drone mission planning models, which additionally account for energy constraints, course corrections, zone prioritization, and the presence of obstacles. Its solution can form the basis for constructing efficient and adaptive flight paths.

Keywords: drone; UAV; maximization of surveyed objects; trajectory planning; discretization; combinatorial optimization; greedy algorithm; partial search; heuristic method.

Fig.: 10. Table: 3. References: 16.

Дмитро Олегович Журко¹, Ірина Володимирівна Білоус²

¹ аспірант кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: dm.zhurko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-4192-7780>

² кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: iryna.bilous.it@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3092-678X>, **ResearcherID:** [G-3887-2014](https://orcid.org/0000-0003-3092-678X)

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛЕЙ ВКЛАДАННЯ СЛІВ В ОБРОБЦІ ПРИРОДНОЇ МОВИ

У статті представлено результати науково-методичного дослідження, присвяченого застосуванню вкладки слів в обробці природної мови. Зокрема, розглянуто основні моделі, такі як Word2Vec, GloVe, FastText, ELMo і BERT та проаналізовано вплив різних параметрів на точність і ефективність цих моделей. Описано наявні корпуси текстів українською мовою, які вже зібрані спільнотою, та можуть застосовуватися для навчання власних моделей. Досліджено використання зібраних корпусів текстів для тренування моделей, дана оцінка поточному прогресу та виявлені пріоритетні напрями для подальших досліджень. Результати роботи можуть бути застосовані для побудови власних моделей у різних предметних областях.

Ключові слова: обробка природної мови; вкладання слів; векторна модель.

Табл.: 1. Рис.: 2. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Стрімке збільшення обчислювальних потужностей за останній час стало ключовою причиною значного прогресу у сфері обробки природної мови. Зокрема, це дозволило обробляти великі масиви текстів та вирішувати задачі пошуку, класифікації та ранжування текстів у різних предметних областях.

Одним зі способів представлення текстів, зручних для подальшої обробки алгоритмами, є представлення слів у вигляді векторів дійсних чисел. Такий підхід у мовному моделюванні, коли слова або фрази зі словника відображаються у вектори дійсних чисел, називається вкладання слів. Векторні представлення слів, отримані такими моделями, як Word2Vec, GloVe, FastText, ELMo і BERT, можна застосувати як вхідні дані для подальшої обробки та аналізу текстів.

Важливість цієї теми також зумовлена зростаючою потребою у високоякісних мовних моделях для текстів українською мовою, які можуть використовуватися в різних предметних областях, таких як освіта, охорона здоров'я, юридична справа чи медіа. При цьому першим кроком є збір необхідних корпусів текстів та їх якісна підготовка для навчання власних моделей, що дозволить підвищити ефективність вже існуючих алгоритмів саме для україномовних текстів.

Постановка проблеми. Існуючі моделі вкладання слів, такі як Word2Vec, GloVe, FastText, ELMo і BERT потребують адаптації перед застосуванням відповідно до наявного корпусу текстів. Це вимагає аналізу параметрів моделей та їхніх архітектур. Додатковим завданням є необхідність оцінки ефективності застосування різних моделей векторного представлення слів у конкретних задачах. Порівняння різних моделей та їхніх параметрів потребує проведення численних експериментів та аналізу результатів.

Крім того, важливою проблемою є відсутність достатньої кількості високоякісних корпусів текстів українською мовою з різних предметних областей. Їх збір потребує додаткових зусиль, що впливає на кількість досліджень у цій сфері.

Аналіз досліджень і публікацій. Ідея представлення слів у вигляді вектора не нова і широко досліджена [1-2]. Сама концепція семантичного простору, де лексичні одиниці (слова або фрази) представлені у вигляді векторів, заснована на вирішенні обчислювальних задач щодо отримання характеристик розподілу слів у тексті. Це дозволило використовувати ці представлення для практичних застосувань, таких як вимірювання схожості

між словами, фразами або цілими документами. Подальший розвиток цього підходу на-самперед був зумовлений необхідністю зменшення високої розмірності отриманого векторного простору, що ускладнювало обчислення [3].

Новий поштовх у розвитку даної моделі був отриманий у 2013 році, коли команда розробників із Google представила Word2vec – модель векторного представлення слів на основі штучних нейронних мереж [4]. У 2014 році було розроблено GloVe (Global Vectors) — модель, яка враховує глобальну статистику спільної появи слів [5], а у 2015 році з'явився FastText, що працює з морфологічними компонентами слів — N-грамами, що виявилось особливо корисним для мов зі складною морфологією, таких як українська [6].

Важливим кроком у розвитку обробки природної мови стала поява моделі ELMo (Embeddings from Language Models), яку у 2018 році представила команда з Інституту Аллена науки про мозок [7]. Модель створює контекстуалізовані векторні представлення слів залежно від їх оточення у реченні. На відміну від попередніх моделей, ELMo використовує двонаправлені рекурентні нейронні мережі (BiLSTM), що дозволяє враховувати навколишній контекст слова при кожному його вживанні. Це суттєво покращило якість представлення багатозначних слів і складних синтаксичних зв'язків.

Проте справжнім проривом у подальшому розвитку архітектур нейронних мереж для глибокого навчання стала поява у 2018 році трансформерів. Зокрема, представлена дослідниками Google модель BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) використовує двонаправлений контекст, тобто розуміє зв'язки між словами не лише зліва направо чи справа наліво, а й з обох напрямків одночасно. Це дозволило їй досягти визначних результатів у задачах розпізнавання іменованих сутностей, класифікації текстів та пошуку. Саме з її появою почалося значне зростання якості NLP-моделей у багатьох мовах [8].

Для багатомовного застосування, включаючи українську мову, було розроблено Multilingual BERT (mBERT) та XLM-R (Cross-lingual Language Model – RoBERTa). Остання підтримує понад 100 мов і демонструє високу ефективність навіть для низькоресурсних мов завдяки багатоетапному попередньому тренуванню та перенесенню знань між мовами [9].

Розглянуті моделі використовуються для вирішення різноманітних задач, у тому числі задачі ранжування. Зокрема, було представлено підхід до покращення ранжування документів за допомогою подвійних векторних представлень слів. Поєднання двох різних моделей векторного представлення дало змогу суттєво покращити точність ранжування документів [10].

Окрему увагу варто звернути на зусилля дослідників, спрямовані на збір необхідних для навчання моделей корпусів текстів. Зокрема, важливим досягненням є зібраний Корпус української мови. Крім нього, українська спільнота збрала корпус публіцистичних текстів та корпус законів та правових актів. Отримані корпуси застосовуються зокрема й для обчислення векторного представлення слів [11].

Зібрані корпуси текстів українською мовою дослідники використовують для побудови моделей векторного представлення слів з їх подальшим практичним застосуванням. Так, у 2016 році група дослідників побудувала модель вкладання слів для кластеризації україномовних академічних текстів за темами. Автори представили документи як усереднені вектори слів і досягли лише 5 % помилкових класифікацій без використання паралельних корпусів [12].

В іншому дослідженні 2023 року була застосована модель RoBERTa для задачі аналізу тональності україномовних відгуків у електронній комерції. Дослідники збрали корпус відгуків, що включає як літературну мову, так і елементи сленгу, суржику та

іншомовних запозичень, після чого здійснили бінарну класифікацію (позитивна/негативна тональність), досягнувши точності у 92 %. Запропонований підхід може бути використаний у маркетингових аналітичних системах для моніторингу клієнтських відгуків та оцінюванні якості обслуговування [13].

У 2024 році група дослідників використала векторні представлення частин слів для створення зворотного словника термінів у галузі фізики українською мовою. Автори сегментували фізичні терміни та їх визначення з «Пояснювального словника з фізики» на морфеми, після чого побудували модель векторного представлення отриманих частин слів. Ці представлення використовувались для знаходження найбільш відповідного терміна за його визначенням, таким чином довівши можливість застосування моделей вкладання слів у задачах термінологічної інженерії українською мовою [14].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Очікувано, що більшість досліджень зосереджено саме на англійських текстах, що створює труднощі в застосуванні моделей векторного представлення слів до українських текстів через відмінності у структурі та лексичному складі мов. Це, зокрема, включає й налаштування параметрів моделей для оптимальної роботи з україномовними даними.

Крім того, для досліджень необхідні великі корпуси текстів українською мовою з різних предметних областей. При цьому тексти для різних предметних областей можуть мати різний вплив на ефективність моделей та їх застосування в задачах обробки природної мови.

Мета дослідження. Проаналізувати існуючі методи векторного представлення слів для задач обробки природної мови українською мовою, враховуючи наявні корпуси текстів, та запропонувати їх вдосконалення.

Виклад основного матеріалу. Векторне представлення слів — це низка методів, які використовуються в обробці природної мови, і полягають у відображенні слів у відповідні їм вектори дійсних чисел у багатовимірному просторі. При цьому семантично схожі слова матимуть відповідні їм вектори, що знаходяться ближче один до одного у векторному просторі, аніж слова, що є семантично несхожими. Такий підхід є гарним способом представити людську мову у вигляді зрозумілих математичних об'єктів (векторів), алгоритми обробки яких відомі. У подальшому ці дані можна використовувати для пошуку, порівняння або сортування текстів.

Word2Vec. Одним із найбільш відомих і широко використовуваних методів векторного представлення слів залишається Word2Vec. Word2Vec — це модель векторного представлення слів, розроблена командою дослідників із Google у 2013 році [4]. Вона працює на основі штучних нейронних мереж і може використовувати один із двох підходів: модель «неперервної торби слів» (continuous bag-of-words, CBOW) або skip-grams. У той час як перша архітектура прогнозує поточне слово на основі контексту (оточуючих слів), то друга архітектура навпаки прогнозує контекст (оточуючі слова) на основі поточного слова (рис. 1).

Word2Vec є досить швидкою та ефективною у навчанні, що дозволило використовувати її для великих корпусів текстів, що й стало причиною її популярності. Але при цьому для досягнення високої точності при навчанні моделі їй необхідний великий обсяг текстових даних, який не завжди досяжний. До того ж модель має проблеми з обробкою рідкісних слів або слів, які не траплялися під час навчання.

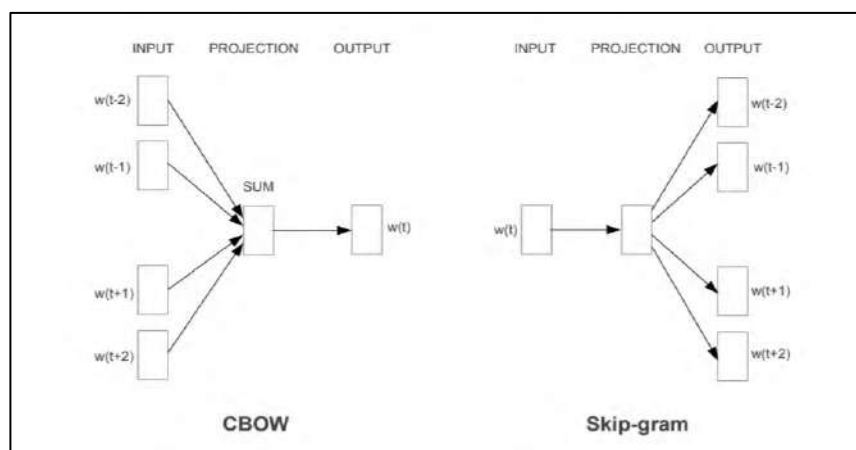


Рис. 1. Графічне представлення моделі CBOW (continuous bag-of-words) і моделі skip-gram

Джерело: [15].

У моделі CBOW навколишні слова ($w(t \pm i)$) перетворюються у векторні представлення та сумуються, щоб передбачити слово посередині ($w(t)$). Модель skip-gram навпаки використовує векторне представлення вхідного слова ($w(t)$) для отримання набору ймовірностей оточуючого контексту ($w(t \pm i)$).

GloVe. GloVe (Global Vectors) – це модель векторного представлення слів, розроблена в Стенфордському університеті у 2014 році [5]. Вона використовує статистику парної спільної появи слів у корпусі текстів. При цьому GloVe намагається врахувати глобальну статистику тексту на відміну від Word2Vec, який фокусується лише на локальному контексті.

Усі слова в корпусі текстів аналізуються, і підраховується частота спільної появи кожної пари слів у певному контекстному вікні. На основі цього формується матриця спільної появи, де кожен елемент показує, скільки разів пара слів з'являється разом у заданому контексті (рис. 2).

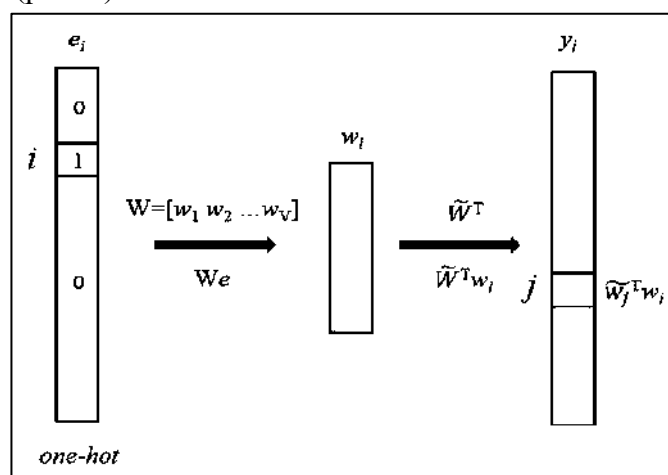


Рис. 2. Архітектура моделі GloVe

Джерело: [16].

Унітарний код (one-hot) слова у вигляді вектора e_i перемножується з матрицею векторів $W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_v]$ усіх слів словника, що дає вектор w_i . Потім обчислюються скалярні добутки $\tilde{W}^T w_i$ вектора w_i з усіма іншими векторами слів словника для отримання вектора y_i . Кожен елемент y_j у цьому векторі відповідає ймовірності слова j у контексті слова i .

Головною перевагою цієї моделі є використання глобальної статистики усього тексту, що дозволяє краще захоплювати його загальну семантику. Але це потребує значних обчислювальних ресурсів для побудови матриці спільної появи та її обробки. До того ж неправильне налаштування моделі, зокрема вибір розміру контекстного вікна, може обмежувати можливість захоплення довгострокових залежностей.

FastText. FastText — це метод векторного представлення слів, розроблений дослідниками з Facebook AI Research у 2015 році [6]. Він розширює можливості Word2Vec, враховуючи морфологічні особливості слів, що дозволяє створювати більш точні векторні представлення, особливо для мов з багатою морфологією.

Головною особливістю цієї моделі є те, що кожне слово розбивається на підпоследовності символів, так звані N-грами. Далі використовуються ті самі підходи, що і в Word2Vec, але вектори створюються не тільки для самих слів, а і для N-грам. Підсумковий вектор слова буде сумою векторів усіх його N-грам.

Таким чином ця модель враховує внутрішню структуру слів, що дозволяє краще працювати з мовами з багатою морфологією. А завдяки використанню N-грам, FastText може створювати вектори для слів, які не зустрічалися в тренувальній вибірці, що особливо корисно для рідкісних або нових слів. Проте використання N-грам потребує більше обчислювальних ресурсів та пам'яті для збереження векторів, а саме налаштування моделі може бути більш складним через додаткові параметри, пов'язані з обробкою N-грам.

ELMo. ELMo (Embeddings from Language Models) – це модель векторного представлення слів, запропонована у 2018 році командою з Інституту Аллена науки про мозок [7]. Вона формує вектори з урахуванням того, в оточенні яких саме інших слів вживається цільове слово.

Основою ELMo є двонаправлені рекурентні нейронні мережі (BiLSTM). Для кожного слова модель генерує вектор, враховуючи як попередні, так і наступні слова. Таким чином кожен вектор є результатом поєднання кількох рівнів абстракції — від лексичного до синтаксичного та семантичного.

Модель ELMo стала важливим досягненням у розвитку моделей вкладання тексту. На відміну від раніше популярних методів, таких як Word2vec чи GloVe, ELMo створює окремі векторні представлення слова для кожного окремого випадку його вживання, беручи до уваги контекст. Word2Vec при цьому генерує єдиний вектор для слова, незалежно від різних випадків його вживання.

BERT. BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) – модель на основі нової архітектури нейронних мереж для глибокого навчання – трансформерів. Вона була представлена дослідниками із Google у 2018 році [8]. Трансформер – це архітектура глибокого навчання, яка обробляє послідовності даних за допомогою механізму уваги. Оригінальні трансформери використовують кодувально-декодувальну архітектуру, тобто складаються з шарів кодування, які перетворюють вхідний текст на набір внутрішніх представлень, та декодування, які перетворюють внутрішні представлення від кодувальника назад у слова.

Проте BERT має свої особливості у порівнянні зі звичайними трансформерами. Ця модель використовує лише кодувальники, оскільки її задача – отримати значення тексту. При цьому вона обробляє контекст двонаправлено, тобто враховує як попередні, так і наступні слова. Це дає їй глибше розуміння контексту, ніж у класичних трансформерів, ідеально підходячи для задач, де важлива семантика всього тексту.

Порівняння методів векторного представлення слів. У табл. 1 наведено порівняння розглянутих методів векторного представлення слів. Зокрема, можна зробити висновки, що різні підходи у побудові моделей, зокрема й у виборі архітектури, вимагають різних ресурсів, при цьому збільшуючи ефективність розуміння контексту та багатозначних слів.

Таблиця 1 – Порівняння методів векторного представлення слів

Критерій	Word2Vec	GloVe	FastText	ELMo	BERT
Архітектура	Нейронна мережа (CBOW, Skip-gram)	Матриця спільної появи слів у всьому корпусі	Нейронна мережа (CBOW, Skip-gram з N-грамами)	Двонаправлені рекурентні нейронні мережі	Трансформер (лише кодувальник)
Контекст	Обмежене симетричне вікно	Глобальний (на основі статистики)	Обмежене вікно з урахуванням частин слів	Повне речення (двостороннє)	Повне речення (двостороннє)
Морфологія	Працює з цілими словами	Працює з цілими словами	Працює з частинами слів (N-грамами)	Використовує посимвольну обробку (CharCNN)	Працює з частинами слів (WordPiece)
Багатозначність	Не підтримується	Не підтримується	Не підтримується	Підтримується	Підтримується
Вимоги до ресурсів	Низькі	Низькі	Середні	Високі	Високі

Джерело: розроблено автором.

Аналіз параметрів моделей. Налаштування дослідником різних параметрів навчання моделей векторного представлення слів впливає на точність та ефективність моделей. Зокрема, важливим параметром при навчанні є розмірність вектора. При цьому збільшення розмірності векторів зазвичай покращує точність, але також збільшує обчислювальні витрати.

Іншим параметром, що налаштовується в процесі навчання моделей, є розмір контекстного вікна. Менші контекстні вікна краще захоплюють локальні залежності, тоді як більші – глобальні залежності. Звісно, свій вплив на точність моделі має і частота слів. При цьому слова, що трапляються частіше, можуть отримувати занадто високу вагу, тому застосовується down-sampling для зменшення впливу дуже частих слів.

Вибір параметрів навчання моделей векторного представлення слів суттєво вплине на ефективність їх роботи з текстами українською мовою, враховуючи її морфологічну складність, багатослівність та наявність діалектизмів.

Оптимальна розмірність вектора для невеликих корпусів (1–10 млн слововживань) має бути меншою, ніж для корпусів на 100+ млн слововживань (як-от Корпус української мови). При цьому варто пам'ятати, що занадто великі розмірності можуть призвести до перенавчання або просто зайвих витрат ресурсів.

Через гнучкий порядок слів в українській мові доцільніше використовувати ширше контекстне вікно, ніж в інших мовах — 5–10 слів. Це дозволить краще захопити синтаксичні зв'язки, які можуть розриватися через вставні конструкції або зміну порядку.

Для очищення словника від шуму для великих корпусів загального призначення мінімальна частота слова для входження має бути встановлена 5. Для менших корпусів із вузькою спеціалізацією (медицина, право тощо) її доцільно зменшити до 2–3.

Варто пам'ятати, що для динамічних предметних областей (наприклад, новини, соцмережі) доцільно регулярно оновлювати модель або донавчати її на нових даних, щоб зберігати актуальність векторного простору.

Таким чином, збільшення розміру векторів підвищує точність, причому для всіх розглянутих моделей, але вимагає більше ресурсів. Збільшення контекстного вікна може покращити розуміння глобальних залежностей, але може і збільшити небажаний шум.

Огляд існуючих корпусів текстів українською мовою. Важливим етапом, з якого починається будь-яка обробка природної мови, є збір корпусу текстів, необхідних для навчання моделей. Очікувано, що найбільш представленими в дослідженнях є моделі, натреновані з використанням текстів англійською мовою. Разом з тим, кожна мова має свої лексичні та морфологічні особливості, тому важливо навчати моделі на корпусі текстів тією мовою, для якої ця модель призначена.

Головним надбанням для дослідників україномовних текстів є Корпус української мови, що містить 100 млн слововживань. Він складається з різних підкорпусів, таких як законодавчі, наукові, фольклорні тексти, публіцистика, художня проза та поетична мова. Найбільший розділ – публіцистика (47 млн слововживань). Корпус розміщено на лінгвістичному порталі MOVA.info, який забезпечує пошук у ньому [11].

Іншим вагомим досягненням є Браунський корпус української мови, що містить 1 млн слововживань. Він побудований на принципах, що були покладені в основу корпусу англійської мови Brown, зокрема використання текстів із різних галузей людської діяльності для якнайбільш рівномірного представлення лексичного багатства української мови. Дані корпусу доступні для використання згідно з умовами ліцензії «Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License», він вільно поширюється за допомогою вебсервісу для спільної розробки програмного забезпечення GitHub [17].

Провідною ініціативою у розвитку української обробки природної мови можна назвати спільноту lang.org.ua. Вона збирає різноманітні корпуси текстів українською мовою, словники, газетири (географічні довідники) та самостійно створює сервіси, бібліотеки й моделі для дослідників та розробників, зокрема й векторні моделі слів, моделі для аналізу тональності текстів та розпізнавання іменованих сутностей, які вільно поширюються на їх сайті [18].

Так, команда проєкту створила анотацію розпізнавання іменованих сутностей для частини Браунського корпусу української мови. Крім цього, вони зібрали корпус текстів української періодики та законів та юридичних актів. На основі цього вони створили моделі векторного представлення слів за допомогою Word2Vec, LexVec та GloVe.

Адаптація моделей до текстів українською мовою. Оскільки більшість існуючих моделей векторного представлення слів спочатку були створені для англійської мови, їх застосування до українських текстів потребує певної адаптації.

Одним із найбільш ефективних методів адаптації мовних моделей до іншомовних корпусів текстів є донавчання (fine-tuning, дослівно: тонке настроювання) — процес повторного навчання вже попередньо натренованої моделі на новому корпусі, що краще відповідає специфіці мови або предметної галузі [19]. Замість повного навчання з нуля, fine-tuning дозволяє використати вже наявні знання моделі про мову, набуті під час попереднього навчання на великому загальному корпусі, і адаптувати їх до нових умов за допомогою додаткового тренування на більш вузькому корпусі текстів.

У випадку роботи з україномовними текстами цей підхід дає змогу досягти високої точності, навіть якщо модель спочатку була навчена переважно на англійськомовних або багатомовних даних. Наприклад, багатомовна версія BERT (mBERT або XLM-R) може бути донавчена на корпусах текстів українською мовою, в результаті чого модель краще відображатиме лексичні та граматичні особливості саме української мови. Доновчання є стандартною технікою при створенні мовних моделей, орієнтованих на специфічні мови або сфери застосування.

Висновки. Існуючі методи векторного представлення слів можуть застосовуватися для різноманітних задач з природної обробки мови текстів українською мовою, враховуючи наявні корпуси текстів. Для основних моделей, таких як Word2Vec, GloVe, FastText, ELMo та BERT, визначені особливості їх реалізації, а також досліджено вплив різних параметрів та архітектур на точність і ефективність моделей.

Окрему увагу приділено огляду існуючих корпусів текстів українською мовою. При цьому виявлено, що більшість досліджень зосереджені на англійськомовних текстах, що створює виклики для застосування моделей векторного представлення слів до українських текстів через відмінності у структурі та лексичному складі мов.

Таким чином, існує необхідність подальшого збору та підготовки корпусів текстів, а також адаптації існуючих моделей до специфіки української мови для покращення їх точності та ефективності.

Список використаних джерел

1. Salton, G. (1962). Some experiments in the generation of word and document associations. In *The December 4-6, 1962, fall joint computer conference*. ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1461518.1461544>.
2. Salton, G., Wong, A., & Yang, C. S. (1975). A vector space model for automatic indexing. *Communications of the ACM*, 18(11), 613–620. <https://doi.org/10.1145/361219.361220>.
3. Bengio, Y., Ducharme, R., Vincent, P., & Jauvin, C. (2003). Neural probabilistic language models. *Journal of Machine Learning Research*, (3), 1137–1155. <https://www.jmlr.org/papers/volume3/bengio03a/bengio03a.pdf>.
4. Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013). Efficient estimation of word representations in vector space. <https://arxiv.org/pdf/1301.3781>.
5. Pennington, J., Socher, R., & Manning, C. (2014). Glove: Global vectors for word representation. In *Proceedings of the 2014 conference on empirical methods in natural language processing (EMNLP)*. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.3115/v1/d14-1162>.
6. Joulin, A., Grave, E., Bojanowski, P., Douze, M., Jégou, H., & Mikolov, T. (2016). Fasttext. zip: Compressing text classification models. <https://arxiv.org/abs/1612.03651v1>.
7. Peters, M., Neumann, M., Iyyer, M., Gardner, M., Clark, C., Lee, K., & Zettlemoyer, L. (2018). Deep contextualized word representations. *Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long Papers)*. <https://arxiv.org/abs/1802.05365>.
8. Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. In *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*. <https://doi.org/10.18653/v1/n19-1423>.
9. Conneau, A., Khandelwal, K., Goyal, N., Chaudhary, V., Wenzek, G., Guzmán, F., Grave, E., Ott, M., Zettlemoyer, L., & Stoyanov, V. (2020). Unsupervised cross-lingual representation learning at scale. In *Proceedings of the 58th annual meeting of the association for computational linguistics*. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/2020.acl-main.747>.
10. Nalisnick, E., Mitra, B., Craswell, N., & Caruana, R. (2016). Improving document ranking with dual word embeddings. In *The 25th international conference companion*. ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2872518.2889361>.
11. Дарчук, Н. (2010). Дослідницький корпус української мови: Основні засади і перспективи. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Літературознавство. Мовознавство. Фольклористика*, 21, 45-49.
12. Kutuzov, A., Kopotev, M., Sviridenko, T., & Ivanova, L. (2016). Clustering comparable corpora of Russian and Ukrainian academic texts: Word embeddings and semantic fingerprints. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.05372>.
13. Zalutskaya, O., Molchanova, M., Sobko, O., Mazurets, O., Pasichnyk, O., Barmak, O.V., & Krak, I. (2023). Method for Sentiment Analysis of Ukrainian-Language Reviews in E-Commerce Using RoBERTa Neural Network. *International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems*. <https://ceur-ws.org/Vol-3387/paper26.pdf>.

14. Vakulenko M., Slyusar V. (2024). Automatic smart subword segmentation for the reverse Ukrainian physical dictionary task. *CEUR Workshop Proceedings*. <https://ceur-ws.org/Vol-3723/paper4.pdf>.
15. Mikolov, T., Le, Q. V., & Sutskever, I. (2013). Exploiting similarities among languages for machine translation. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1309.4168>.
16. Liu, C., Zhang, P., Li, T., & Yan, Y. (2019). Semantic Features Based N-Best Rescoring Methods for Automatic Speech Recognition. *Applied Sciences*, 9(23), 5053. <https://doi.org/10.3390/app9235053>.
17. *GitHub - brown-uk/corpus: Браунський корпус української мови.* (n.d.). GitHub. <https://github.com/brown-uk/corpus>.
18. *Про нас: lang-uk.* (n.d.). Головна: lang-uk. <https://lang.org.ua/uk/about>.
19. Liu, Z., Winata, G. I., Madotto, A., & Fung, P. (2020). Exploring fine-tuning techniques for pre-trained cross-lingual models via continual learning. <https://arxiv.org/abs/2004.14218>.

References

1. Salton, G. (1962). Some experiments in the generation of word and document associations. In *The December 4-6, 1962, fall joint computer conference*. ACM Press. <https://doi.org/10.1145/1461518.1461544>.
2. Salton, G., Wong, A., & Yang, C. S. (1975). A vector space model for automatic indexing. *Communications of the ACM*, 18(11), 613–620. <https://doi.org/10.1145/361219.361220>.
3. Bengio, Y., Ducharme, R., Vincent, P., & Jauvin, C. (2003). Neural probabilistic language models. *Journal of Machine Learning Research*, (3), 1137–1155. <https://www.jmlr.org/papers/volume3/bengio03a/bengio03a.pdf>.
4. Mikolov, T., Chen, K., Corrado, G., & Dean, J. (2013). Efficient estimation of word representations in vector space. <https://arxiv.org/pdf/1301.3781>.
5. Pennington, J., Socher, R., & Manning, C. (2014). Glove: Global vectors for word representation. In *Proceedings of the 2014 conference on empirical methods in natural language processing (EMNLP)*. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.3115/v1/d14-1162>.
6. Joulin, A., Grave, E., Bojanowski, P., Douze, M., Jégou, H., & Mikolov, T. (2016). Fasttext. zip: Compressing text classification models. <https://arxiv.org/abs/1612.03651v1>.
7. Peters, M., Neumann, M., Iyyer, M., Gardner, M., Clark, C., Lee, K., & Zettlemoyer, L. (2018). Deep contextualized word representations. *Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long Papers)*. <https://arxiv.org/abs/1802.05365>.
8. Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. In *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Association for Computational Linguistics*. <https://doi.org/10.18653/v1/n19-1423>.
9. Conneau, A., Khandelwal, K., Goyal, N., Chaudhary, V., Wenzek, G., Guzmán, F., Grave, E., Ott, M., Zettlemoyer, L., & Stoyanov, V. (2020). Unsupervised cross-lingual representation learning at scale. In *Proceedings of the 58th annual meeting of the association for computational linguistics*. Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/2020.acl-main.747>.
10. Nalisnick, E., Mitra, B., Craswell, N., & Caruana, R. (2016). Improving document ranking with dual word embeddings. In *The 25th international conference companion*. ACM Press. <https://doi.org/10.1145/2872518.2889361>.
11. Darchuk, N. (2010). Doslidnytskyi korpus ukraïnskoi movy: osnovni zasady i perspektyvy [Research corpus of the Ukrainian language: Basic principles and prospects] *Visnik Kyivskoho natsionalnoho universitetu imeni T. Shevchenka. Seriya: Literaturoznavstvo. Movoznavstvo. Folklorystyka – Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Series: Literary studies. Linguistics. Folklore studies*, (21), 45-49.
12. Kutuzov, A., Kopotev, M., Sviridenko, T., & Ivanova, L. (2016). Clustering comparable corpora of Russian and Ukrainian academic texts: Word embeddings and semantic fingerprints. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.05372>.
13. Zalutska, O., Molchanova, M., Sobko, O., Mazurets, O., Pasichnyk, O., Barmak, O.V., & Krak, I. (2023). Method for Sentiment Analysis of Ukrainian-Language Reviews in E-Commerce Using RoBERTa Neural Network. *International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems*. <https://ceur-ws.org/Vol-3387/paper26.pdf>.

14. Vakulenko M., Slyusar V. (2024). Automatic smart subword segmentation for the reverse Ukrainian physical dictionary task. *CEUR Workshop Proceedings*. <https://ceur-ws.org/Vol-3723/paper4.pdf>.
15. Mikolov, T., Le, Q. V., & Sutskever, I. (2013). Exploiting similarities among languages for machine translation. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1309.4168>.
16. Liu, C., Zhang, P., Li, T., & Yan, Y. (2019). Semantic Features Based N-Best Rescoring Methods for Automatic Speech Recognition. *Applied Sciences*, 9(23), 5053. <https://doi.org/10.3390/app9235053>.
17. *GitHub – brown-uk/corpus: Braunskyi korpus ukrainskoi movy [GitHub - brown-uk/corpus: The Brown Corps of the Ukrainian language]*. (n.d.). GitHub. <https://github.com/brown-uk/corpus>
18. *Pro nas: lang-uk.* (n.d.). *Holovna: lang-uk.* [About us: *lang-uk.* (n.d.). *The Head: lang-uk.* <https://lang.org.ua/uk/about>.
19. Liu, Z., Winata, G. I., Madotto, A., & Fung, P. (2020). Exploring fine-tuning techniques for pre-trained cross-lingual models via continual learning. <https://arxiv.org/abs/2004.14218>.

Отримано 21.03.2025

UDC 004.855.2

Dmytro Zhurko¹, Iryna Bilous²

¹ PhD student, recipient of the Doctor of Philosophy degree in specialty 122
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: dm.zhurko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-4192-7780>

² PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Information Technology and Software Engineering Department,
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: iryna.bilous.it@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3092-678X>. **ResearcherID:** [G-3887-2014](https://orcid.org/0000-0003-3092-678X)

USING WORD EMBEDDING MODELS IN NATURAL LANGUAGE PROCESSING

The paper presents findings of the scientific and methodological investigation of word embedding models for application in natural language processing (NLP). The research is timely due to rapid advancements in computational power, enabling large-scale text analysis.

The study is focused on adapting existing word embedding models — Word2Vec, GloVe, FastText, ELMo and BERT — to the under-represented Ukrainian language. While effective for English texts, these models are difficult to use for Ukrainian due to linguistic specifics and lack of quality resources.

The objective is to compare these models for Ukrainian text processing and suggest improvements based on existing corpora. The paper reviews their architectures, training parameters, and highlights their pros and cons. FastText is effective with infrequent and morphologically rich words and is hence a good candidate for Ukrainian; Word2Vec is effective and simple to use; GloVe is effective for capturing global co-occurrence.

Compared to these static embedding models, ELMo generates contextualized word representations that had better handle polysemy and syntactic variation, although it requires more computational resources. BERT further improves contextual understanding through its transformer-based bidirectional architecture, outperforming previous models in NLP tasks; however, it is more demanding in terms of memory and training time.

Comparative assessment is given that illustrates how word frequency thresholds, context window size, and vector size affect accuracy in models. The study stresses relevance of tuning parameters to match task-specific and linguistic needs.

The research also encompasses Ukrainian-language resources like Ukrainian Language Corpus (100M tokens), Brown Ukrainian Corpus (1M tokens), and community resources like lang.org.ua. However, there is a lack of available, annotated resources that limit larger-scale experiments.

In conclusion, this work highlights the need for ongoing development of the corpus and better embedding model adaptation to Ukrainian. It makes recommendations to enhance accuracy and efficiency of models for educational, health care, legal, and mass media applications.

Keywords: natural language processing; word embedding; vector model.

Tables: 1. **Figures:** 2. **References:** 19.

Павло Володимирович Зінченко¹, Дмитро Борисович Мехед²¹аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: zinchenkop@protonmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4573-6463>. ResearcherID: MDS-7976-2025²кандидат педагогічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та математичного моделювання

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: d.mekhed@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3905-3620>

ResearcherID: H-1751-2016. SCOPUS Author ID: 57193823626

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАПИТІВ GraphQL

Представлена у статті інформація має оглядовий характер. Сучасні виклики бізнесу потребують використання сучасних рішень для моніторингу та оптимізації програмних продуктів. Для ефективного моніторингу за допомогою GraphQL API необхідно проводити оптимізацію запитів. У статті виконано огляд деяких способів оптимізації запитів до GraphQL API: фільтрації та запиту декількох вузлів даних. На практичних прикладах використання GraphQL API популярного CDN постачальника Cloudflare було визначено, що фільтрація дозволяє зменшити обсяги отриманих даних, а запит декількох вузлів даних зменшує кількість запитів до API. Окремо підкреслюється важливість вивчення обмежень постачальників послуг та коректного формування фільтрів в запитах.

Ключові слова: оптимізація; моніторинг; мова запитів; Cloudflare; API інтеграція.

Табл.: 1. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Представлена у статті інформація має оглядовий характер. Оптимізація та моніторинг сервісів, є важливими етапами життєвого циклу програмних продуктів [1]. Вони дозволяють забезпечувати стабільну роботу систем, своєчасно виявляти проблеми та усувати їх до того, як вони вплинуть на користувачів. Регулярний моніторинг допомагає отримати інформацію про продуктивність, доступність та ефективність сервісів, а оптимізація дозволяє підвищити їхню продуктивність, зменшити витрати на інфраструктуру та адаптувати системи до змін у навантаженні. У результаті ці процеси не лише підвищують якість продукту, але і сприяють економічній ефективності та довгостроковій стабільності бізнесу. Тому при розробці та підтримці програмних продуктів пошук та аналіз ефективних способів покращення моніторингу або оптимізації сервісів актуальний завжди.

Постановка проблеми. Продукти компаній можуть залежати від декількох зовнішніх постачальників послуг, наприклад CDN-постачальників, постачальників даних тощо. Зовнішні постачальники послуг, можуть надавати статистику використання їх сервісів і зазвичай роблять це через окремі вебсторінки. Цю статистику можна використовувати в цілях моніторингу сервісів компанії або для аналізу вузьких місць продуктів та подальшої оптимізації. Проте постає проблема — окремі вебсторінки, створюють незручності для компанії, особливо коли один продукт залежить від кількох таких постачальників. Перемикання між різними інтерфейсами та форматами даних ускладнює отримання цілісної картини й вимагає додаткового часу й зусиль. Це може призводити до втрати ефективності, помилок в аналізі та підвищення складності управління продуктом. Для вирішення цієї проблеми все частіше використовують централізовані рішення — комплексні моніторингові системи які об'єднують статистику з різних джерел у єдиний зручний інтерфейс за допомогою інтеграцій, спрощуючи процес аналізу. Однак навіть із такими системами постає інша проблема — такі інтеграції зазвичай є базовими, надаючи або багато зайвої інформації, або недостатньо інформації. До того ж ця інформація зазвичай не поєднана з бізнес-логікою продукту, що знижує їхню практичну цінність і потребує додаткового доопрацювання.

Компанії можуть розробляти власні інтеграції з використанням API, що дозволяє налаштувати моніторинг відповідно до специфіки продукту. Однак такий підхід має свої виклики. Здебільшого постачальники послуг надають REST API, який часто повертає

велику кількість непотрібної інформації, що ускладнює її обробку та потребує додаткових зусиль для фільтрації та структурування. Крім того, для отримання всіх необхідних даних доводиться робити багато запитів [2], що може суттєво навантажувати інтеграцію, особливо у випадках великого обсягу даних. Це також може призвести до додаткових витрат, пов'язаних з оплатою використання API, оскільки деякі постачальники стягують додаткову плату за понаднормову кількість запитів або високий обсяг переданих даних. Таким чином, власні інтеграції на основі REST API хоч і забезпечують більшу гнучкість поєднуючи статистику із бізнес-логікою продуктів компанії, але потребують ретельного планування, додаткових ресурсів, щоб уникнути зайвих витрат і знизити ризики перевантаження моніторингу системи. Часткове вирішення цих проблем — GraphQL API.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із сучасних ефективних рішень для вирішення зазначених проблем є використання GraphQL API, якщо постачальник послуг його надає [3]. Як показало одне із досліджень «REST vs GraphQL: A Controlled Experiment» [2], ця технологія дозволяє ефективніше працювати із даними, зменшивши кількість запитів до API, а також вона простіша для розуміння в порівнянні із REST API. Вибір цієї технології значно оптимізує роботу власних інтеграцій компанії та знижує навантаження на інструменти моніторингу та їх розробку, а також може допомогти уникнути зайвих витрат. В іншому дослідженні пропонують оптимальні методи розрахунку ціни виконання запитів до GraphQL API за допомогою ML (machine learning) як зі сторони сервера, так і зі сторони клієнта [4]. Водночас у науковому середовищі не знайшлося досліджень, статей, тез на тему оптимізації GraphQL запитів із погляду клієнта із практичними прикладами.

Тому **мета цієї статті** проаналізувати способи оптимізації GraphQL запитів з боку клієнта на основі практичних прикладів запитів до API постачальника CDN послуг Cloudflare [5].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз наявних наукових робіт показав відсутність практичних прикладів способів оптимізації GraphQL запитів для складних, великих інформаційних систем постачальників послуг.

Виклад основного матеріалу. GraphQL — це мова запитів для API та середовище виконання, яке дозволяє клієнтам отримувати саме ті дані, які потрібні, без надлишкової інформації. Його основна перевага полягає в гнучкості, що дає змогу формувати запити під конкретні потреби, оптимізуючи роботу з даними [6].

Побудуємо простий graphql-запит для отримання базової статистики кількості запитів до доменної зони за допомогою curl:

```
{
  viewer {
    zones( filter: { zoneTag: "1234567890abcdef1234567890abcdef" } ) {
      httpRequestsAdaptiveGroups (
        filter: {
          datetime_geq: "2025-01-01T00:00:00Z"
          datetime_leq: "2025-01-02T00:00:00Z"
        }
      ) {
        count
        sum { edgeResponseBytes }
      }
    }
  }
}
```

У цьому запиті viewer і zones визначають область доступу, filter разом з zoneTag фільтрує дані для конкретної зони, httpRequestsAdaptiveGroups вузол повертає дані за останній день (за допомогою filter із визначенням початку та кінця проміжку часу для збору статистики) із

сумарною кількістю запитів (count) і переданих байтів (edgeResponseBytes). Побудований graphql-запит можна надіслати через команду curl, наприклад:

```
cat ./query.txt | tr -d '\n' | curl --silent \
https://api.cloudflare.com/client/v4/graphql \
--header "Authorization: Bearer <cloudflare_API_ключ>" \
--header "Content-Type: application/json" \
--data @-
```

де ./query.txt файл із підготовленим graphql-запитом та екранованими символами. У результаті такого API запиту отримаємо приблизно наступну відповідь:

```
{
  "data": {
    "viewer": {
      "zones": [ {
        "httpRequestsAdaptiveGroups": [ {
          "count": { "requests": 333222111 },
          "sum": { "edgeResponseBytes": 5444333222111 }
        } ]
      } ]
    }
  }
}
```

У результаті повертаються дані за період з 2025-01-01 до 2025-01-02 (1 день), де загальна кількість запитів до зони (requests) складає 333222111, а обсяг переданих даних (edgeResponseBytes) — 5444333222111 байтів. Ця інформація надає загальний огляд статистики зони, але не дозволяє детально аналізувати конкретні проблеми, пов'язані з роботою сервісів компанії, використанням їхніх ресурсів, географічними особливостями або налаштуванням кешування. Тому варто розглянути приклад graphql-запиту із додатковими параметрами, який надасть глибше розуміння ситуації:

```
query { viewer { zones( filter: { zoneTag: "1234567890abcdef1234567890abcdef" } ) {
  httpRequestsAdaptiveGroups (
    filter: {
      datetime_geq: "2025-01-01T00:00:00Z"
      datetime_leq: "2025-01-02T00:00:00Z"
    }
  ) {
    count
    sum { edgeResponseBytes }
    dimensions {
      clientRequestHTTPHost
      clientRequestPath
      clientRequestHTTPMethodName
      cacheStatus
      edgeResponseStatus
      userAgent
    }
  }
} } }
```

У цьому запиті додані параметри dimensions, які дозволяють згрупувати дані про кількість запитів та обсяг переданого трафіку за вказаними полями, а саме:

- clientRequestHTTPHost — FQDN (fully qualified domain name) до якого зверталися користувачі, наприклад www.company.com, app.company.com;
- clientRequestPath — шлях ресурсу до якого звертається клієнт, напр./app/auth;
- clientRequestHTTPMethodName — HTTP метод, який використовує користувач для запиту, наприклад GET, POST;
- cacheStatus — кеш статус, який повернув Cloudflare, напр. HIT, MISS, NONE та інші;
- edgeResponseStatus — HTTP код відповіді Cloudflare до користувача, напр. 200, 503;
- userAgent — рядок із характеристиками, за якими сервери та мережеві вузли можуть визначити тип застосунку, операційну систему, виробника та/або версію користувацького

агента, наприклад Mozilla/5.0 (X11; Linux x86_64) AppleWebKit/537.36 (KHTML, like Gecko) Chrome/51.0.2704.103 Safari/537.36.

У результаті отримаємо схожу відповідь:

```
{
  "data": {
    "viewer": {
      "zones": [ {
        "httpRequestsAdaptiveGroups": [ {
          "dimensions": {
            "clientRequestHTTPHost": "status.company.com"
            "clientRequestPath": "/"
            "clientRequestHTTPMethodName": "GET"
            "cacheStatus": "NONE"
            "edgeResponseStatus": "200"
            "userAgent": "Mozilla/5.0 (X11; Linux x86_64) AppleWebKit/537.36 (KHTML, like Gecko) Chrome/51.0.2704.103 Safari/537.36"
          }
          "count": { "requests": 233222111 },
          "sum": { "edgeResponseBytes": 3444333222111 }
        },
        {
          "dimensions": {
            "clientRequestHTTPHost": "app.company.com"
            "clientRequestPath": "/auth"
            "clientRequestHTTPMethodName": "POST"
            "cacheStatus": "NONE"
            "edgeResponseStatus": "200"
            "userAgent": "Mozilla/5.0 (X11; Linux x86_64) AppleWebKit/537.36 (KHTML, like Gecko) Chrome/51.0.2704.103 Safari/537.36"
          }
          "count": { "requests": 133222111 },
          "sum": { "edgeResponseBytes": 2444333222111 }
        },
        {
          "dimensions": {
            "clientRequestHTTPHost": "app.company.com"
            "clientRequestPath": "/auth"
            "clientRequestHTTPMethodName": "POST"
            "cacheStatus": "NONE"
            "edgeResponseStatus": "503"
            "userAgent": "Mozilla/5.0 (X11; Linux x86_64) AppleWebKit/537.36 (KHTML, like Gecko) Chrome/55.0.0000.00 Safari/537.36"
          }
          "count": { "requests": 22111 },
          "sum": { "edgeResponseBytes": 222111 }
        }
      ]
    }
  }
}
```

З використанням більш деталізованого запиту можна глибше проаналізувати дані та ідентифікувати потенційні проблеми в роботі сервісу, як у цьому прикладі, пов'язані з авторизацією. Вигадана проблема авторизації не є предметом аналізу в цій статті, але важливо зазначити, що висока деталізація даних, тобто велика кількість запитувальних полів, може призвести до іншої складності — великої кількості унікальних елементів у відповіді у вузлі `httpRequestsAdaptiveGroups`.

Велика кількість елементів у вузлі `httpRequestsAdaptiveGroups` може викликати проблеми. Одна із проблем виникає через обмеження Cloudflare GraphQL API, яке дозволяє повернути максимум 10000 елементів у межах одного вузла відповіді [7]. У разі перевищення цього ліміту частина даних не буде включена у відповідь, що може

спотворити результати аналізу. Основною причиною збільшення кількості елементів є велика кількість унікальних значень у деяких полях, зазначених у dimensions, таких як clientRequestHTTPHost, clientRequestPath і userAgent. Наприклад, якщо в запиті є 3 унікальних значення httpRequestsAdaptiveGroups, 5 різних шляхів у clientRequestPath і 100 унікальних значень userAgent (різні версії браузерів), то їх комбінація створює $3 \times 5 \times 100 = 1500$ унікальних елементів. Ця кількість може легко зростати з додаванням нових полів або збільшенням кількості унікальних значень у кожному з них.

Якщо кількість елементів у відповіді перевищує встановлений ліміт у 10000, Cloudflare автоматично обрізає відповідь, залишаючи тільки дозволену кількість елементів. Це може призвести до втрати важливої інформації та ускладнити аналіз. Тому при розробці інтеграцій з API зовнішніх постачальників послуг необхідно враховувати ці обмеження.

Оптимізація. Залежно від специфіки поставленої задачі, яку має виконувати інструмент моніторингу, можливі різні варіанти використання. Кожен із цих варіантів визначає рівень деталізації та обсяг даних, необхідних для забезпечення ефективного контролю та аналізу. Основні випадки включають:

- Моніторинг окремого сервісу — цей підхід передбачає збір інформації про стан і продуктивність конкретного сервісу. Він актуальний у випадках, коли необхідно детально аналізувати роботу окремого компонента системи, наприклад, для виявлення проблем, аналізу продуктивності або оптимізації окремих процесів.

- Моніторинг набору сервісів — у цьому випадку інструмент моніторингу здійснює збір даних про кілька визначених сервісів, що входять до певної групи. Такий підхід зазвичай використовується для аналізу взаємодії між сервісами, відстеження загальної продуктивності окремих кластерів або компонентів, які мають спільну функціональність.

- Моніторинг усіх сервісів у межах зони — цей сценарій охоплює збір даних про всі сервіси, які функціонують у певній зоні або домені. Такий підхід дозволяє отримати повний огляд загального стану інфраструктури, виявити аномалії, розподілити ресурси або забезпечити безперервність роботи в масштабах всієї системи.

Кожен із цих варіантів вимагає чітко визначеного підходу до налаштування інтеграцій, відповідного рівня агрегації даних. Для вирішення зазначених завдань можна застосовувати фільтрацію та запит одразу декількох вузлів. Ці способи можна використовувати як окремо, так і в комбінації, залежно від потреб і специфіки моніторингових задач. Розглянемо кожен із цих способів.

Одним із найпростіших способів оптимізації GraphQL-запитів є **застосування фільтрації**. Замість того щоб отримувати дані про всі сервіси в зоні, можна сфокусуватися на конкретному об'єкті моніторингу, наприклад, окремому сервісі або відповідному FQDN (Fully Qualified Domain Name). Це значно знижує обсяг отримуваних даних, скорочує час обробки запитів і підвищує продуктивність інтеграції.

У наведених вище прикладах вже використовувалась фільтрація для визначення часового проміжку збору статистики за допомогою параметрів datetime_geq і datetime_leq. Подібним чином можливо фільтрувати дані за будь-яким доступним полем. Наприклад, якщо потрібно отримати інформацію про запити, що надійшли на певний домен, можна використовувати фільтр за полем clientRequestHTTPHost:

```
...
  httpRequestsAdaptiveGroups (
    filter: {
      datetime_geq: "2025-01-01T00:00:00Z"
      datetime_leq: "2025-01-02T00:00:00Z"
      clientRequestHTTPHost: "app.company.com"
    }
  )
...
```

У цьому прикладі фільтрація здійснюється за точним збігом значення поля `fqdn` із зазначеним у фільтрі. Однак можливості фільтрації не обмежуються лише точним збігом – для фільтрації можуть бути використані так звані оператори, що дозволяють гнучкіше налаштовувати запити. Поля для визначення часових проміжків вже демонструють використання операторів, де префікси `_geq` означає "greater or equal" (більше або дорівнює), а `_leq` – "lower or equal" (менше або дорівнює). Для текстових полів, таких як `clientRequestHTTPHost`, можна застосовувати оператори на кшталт `_like`, `_in` та інших операторів, залежно від функціонала постачальника послуг. Варто зазначити, що оператори, як і типи даних, є реалізацією постачальника послуг, а не частиною самого GraphQL [8]. Це означає, що набір доступних операторів і їх функціональність можуть відрізнятися залежно від обраного постачальника. Тому під час роботи з API важливо звертатися до документації, щоб коректно використовувати доступні інструменти фільтрації.

Іншим способом оптимізації, який дозволяє зменшити кількість GraphQL-запитів, є **запиту кількох вузлів одночасно**. Це дозволяє отримувати дані з різних частин API за один виклик або із тієї самої частини джерела для двох фільтрів одночасно за один виклик.

Наприклад, замість виконання кількох окремих запитів для збору даних для різних фільтрів, можна об'єднати ці запити в один. Цей підхід не лише оптимізує взаємодію із сервером, а й підвищує ефективність роботи клієнтської програми, зменшуючи затримки, пов'язані з обробкою кількох послідовних викликів.

```
query { viewer { zones( filter: { zoneTag: "1234567890abcdef1234567890abcdef" } ) {
  first_group: httpRequestsAdaptiveGroups (
    filter: {
      datetime_geq: "2025-01-01T00:00:00Z"
      datetime_leq: "2025-01-02T00:00:00Z"
      clientRequestHTTPHost: "app.company.com"
    }
  ) { count }
  another_group: httpRequestsAdaptiveGroups (
    filter: {
      datetime_geq: "2025-01-01T00:00:00Z"
      datetime_leq: "2025-01-02T00:00:00Z"
      clientRequestHTTPHost: "status.company.com"
    }
  ) { count }
} } }
```

До того ж цей спосіб оптимізації дозволяє отримувати більший обсяг даних за один GraphQL-запит, оскільки кожен окремий вузол повертає до 10000 елементів. Таким чином, із двох вузлів у межах одного запиту можна отримати до 20000 елементів одночасно.

Однак, при додаванні додаткових вузлів, якщо вони пов'язані із тією самою частиною API, важливо уважно налаштовувати фільтри, щоб дані, що відфільтровуються, не перекривалися. Нехтування цим правилом може призвести до дублювання даних, що ускладнює їх обробку та аналіз. Точне визначення фільтрів для кожного вузла є важливим аспектом для забезпечення коректності отриманих результатів.

Ознайомившись із двома способами оптимізації розглянемо результати оптимізації реальних GraphQL-запитів на реальному прикладі. Доменні імена сервісів змінені на вигадані через NDA. Задача наступна: отримати кількість запитів до сервісу та кількість переданих байтів сервісом за кожен день, протягом останніх 30 днів. Не оптимізований GraphQL-запит виглядає наступним чином:

```
{ viewer { zones( filter: { zoneTag: "1234567890abcdef1234567890abcdef" } ) {
  group1: httpRequestsAdaptiveGroups (
    filter: {
      datetime_geq: "2025-01-01T00:00:00Z"
      datetime_leq: "2025-01-02T00:00:00Z"
    }
  ) { count sum { edgeResponseBytes } dimensions { clientRequestHTTPHost } }
} } }
```

Перша проблема полягає в тому, що цей запит потрібно буде виконати **30 разів**, (кожного разу міняючи дату на наступний день), через це швидкість отримання всіх даних в циклі сумарно дорівнює близько **10,3 секунди**. Друга проблема в тому, що кожна відповідь повертає інформацію про всі сервіси, тому кожного разу потрібно буде обробляти велику кількість інформації. Сумарно всі запити повернули **406 190 байтів** для обробки. Тепер застосуємо розглянуті способи оптимізації: фільтрацію та запит декількох вузлів:

```
{ viewer { zones( filter: { zoneTag: "1234567890abcdef1234567890abcdef" } ) {
  group1: httpRequestsAdaptiveGroups (
    filter: {
      datetime_geq: "2025-01-01T00:00:00Z"
      datetime_leq: "2025-01-02T00:00:00Z"
      clientRequestHTTPHost: "download.company.com"
    }
  ) { count sum { edgeResponseBytes } dimensions { clientRequestHTTPHost } }
  group2: httpRequestsAdaptiveGroups (
    filter: {
      datetime_geq: "2025-01-02T00:00:00Z"
      datetime_leq: "2025-01-03T00:00:00Z"
      clientRequestHTTPHost: "download.company.com"
    }
  ) { count sum { edgeResponseBytes } dimensions { clientRequestHTTPHost } }
  ...
  group15: httpRequestsAdaptiveGroups (
    filter: {
      datetime_geq: "2025-01-15T00:00:00Z"
      datetime_leq: "2025-01-16T00:00:00Z"
      clientRequestHTTPHost: "download.company.com"
    }
  ) { count sum { edgeResponseBytes } dimensions { clientRequestHTTPHost } }
} } }
```

У Cloudfalre існують обмеження на надмірне використання GraphQL API, тому оптимізований запит охоплює інформацію за 15 днів. Після оптимізації, для отримання такої самої кількості інформації потрібно буде виконати запит всього **2 рази** (по 15 днів у кожному). Загальний час виконання цих запитів займе **2,6 секунди** та необхідно буде обробити всього **4188 байтів** сумарно.

Як видно, якщо порівняти запити без оптимізації та запити із застосованими розглянутими в статті способами оптимізації – спостерігається загальний приріст у швидкості майже в **4 рази**, а кількість інформації для обробки зменшилась майже в **97 разів**. Проте варто розуміти, що для різних задач і даних – будуть зовсім різні результати. Для наочності додається порівняльна таблиця застосованих способів оптимізації.

Таблиця 1 – порівняльна таблиця способів оптимізації

Оптимізація запиту	Кількість запитів	Повернуто байт (сумарно для всіх запити), байт	Швидкість виконання (сумарно для всіх запитів), с
Без оптимізації	30	406190	~10,3
Тільки фільтрація	30	8850	~8,2
Тільки запит кількох вузлів	2	402822	~3,1
Фільтрація та запит кількох вузлів	2	4188	~2,6

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Оптимізація та моніторинг є важливими складовими життєвого циклу будь-якого продукту. Вони забезпечують стабільну роботу систем, допомагають швидко ідентифікувати проблеми та оперативно їх вирішувати, що підвищує якість послуг для кінцевих користувачів. У випадках, коли продукти використовують зовнішніх постачальників послуг, котрі надають статистику через GraphQL API, ефективна оптимізація запитів для отримання статистики використання цих постачальників послуг

стає важливою. Завдяки правильній побудові GraphQL-запитів можна зменшити обсяг отриманих даних, скоротити час виконання запитів і знизити витрати на використання API. Це дозволяє отримувати потрібну інформацію без перевантаження систем моніторингу зайвими даними.

Одним із найпростіших та водночас ефективних способів оптимізації GraphQL-запитів є використання фільтрації. За допомогою фільтрів можна чітко визначити, які саме дані потрібні, обмежуючи запит лише релевантною інформацією. Наприклад, фільтрація за часовими проміжками, доменами чи іншими параметрами дозволяє зосередитись на вузькому наборі даних, уникаючи отримання непотрібної інформації. Інший спосіб оптимізації — запит кількох вузлів одночасно. Це дозволяє поєднати дані з різних джерел або фільтрів у межах одного виклику, зменшуючи кількість запитів до API. Такий підхід особливо корисний, коли необхідно обробляти великі обсяги даних або працювати з кількома сегментами одночасно.

Водночас важливо враховувати технічні обмеження постачальників послуг, адже вони можуть впливати на кількість даних, які можна отримати за один запит. Наприклад, у Cloudflare GraphQL API існує ліміт на максимальну кількість елементів у межах одного вузла — до 10 000 і якщо кількість елементів у запиті перевищує цей ліміт, частина даних може бути обрізана, тобто відповідь буде неповна. Також під час планування інтеграцій із GraphQL API необхідно ретельно підбирати фільтри, уникаючи перетину даних, які створюють дублікацію елементів.

Розглянутий у статті реальний приклад оптимізації graphql-запитів підтвердив ефективність оптимізації. Результат оптимізації в прикладі полягає в пришвидшенні отримання інформації майже в 4 рази, а кількість інформації для обробки зменшилась майже в 97 разів.

У підсумку, можна сказати, що оптимізація GraphQL-запитів не лише підвищує продуктивність моніторингових рішень, а й забезпечує точність і повноту зібраної інформації, що є дуже важливим для моніторингу продукту.

Список використаних джерел

1. Sai, K. (n.d.). DevOps Monitoring. Increase awareness during each stage of the delivery pipeline. *Atlassian*. <https://www.atlassian.com/devops/devops-tools/devops-monitoring>.
2. Brito, G., & Valente, M.T. (2020, March). REST vs GraphQL: A controlled experiment. In *2020 IEEE international conference on software architecture (ICSA)* (pp. 81-91). IEEE. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.04761>.
3. Jones, D. (2023, 16 December). Emerging trends in graphql apis: the technology powering the future of data exchange. *Postman, Inc.* <https://blog.postman.com/emerging-trends-graphql-apis-technology-future-of-data-exchange>.
4. Mavroudeas, G., Baudart, G., Cha, A., Hirzel, M., Laredo, J. A., Magdon-Ismail, M., & Wittern, E. (2021). Learning graphql query costs (extended version). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.11139>.
5. Nisenzoun, F. (2019, 12 hrudnia). Introducing the graphql analytics api: exactly the data you need, all in one place. *The Cloudflare Blog*. <https://blog.cloudflare.com/introducing-the-graphql-analytics-api-exactly-the-data-you-need-all-in-one-place>.
6. Byron, L. (2015, 14 veresnia). GraphQL: A data query language. *GraphQL*. <https://graphql.org/blog/2015-09-14-graphql>.
7. *GraphQL API - limits*. *cloudflare analytics docs*. (n.d.). *Cloudflare Docs*. <https://developers.cloudflare.com/analytics/graphql-api/limits>.
8. *Filtering*. *cloudflare analytics docs*. (n.d.). *Cloudflare Docs*. <https://developers.cloudflare.com/analytics/graphql-api/features/filtering>.

References

1. Sai, K. (n.d.). DevOps Monitoring. Increase awareness during each stage of the delivery pipeline. *Atlassian*. <https://www.atlassian.com/devops/devops-tools/devops-monitoring>.

2. Brito, G., & Valente, M.T. (2020, March). REST vs GraphQL: A controlled experiment. In *2020 IEEE international conference on software architecture (ICSA)* (pp. 81-91). IEEE. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.04761>.
3. Jones, D. (2023, 16 travnia). Emerging trends in graphql apis: the technology powering the future of data exchange. *Postman, Inc.* <https://blog.postman.com/emerging-trends-graphql-apis-technology-future-of-data-exchange>.
4. Mavroudeas, G., Baudart, G., Cha, A., Hirzel, M., Laredo, J. A., Magdon-Ismail, M., & Wittern, E. (2021). Learning graphql query costs (extended version). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.11139>.
5. Nisenzoun, F. (2019, 12 hrudnia). Introducing the graphql analytics api: exactly the data you need, all in one place. *The Cloudflare Blog*. <https://blog.cloudflare.com/introducing-the-graphql-analytics-api-exactly-the-data-you-need-all-in-one-place>.
6. Byron, L. (2015, 14 veresnia). GraphQL: A data query language. *GraphQL*. <https://graphql.org/blog/2015-09-14-graphql>.
7. *GraphQL API - limits*. *cloudflare analytics docs*. (n.d.). *Cloudflare Docs*. <https://developers.cloudflare.com/analytics/graphql-api/limits>.
8. *Filtering*. *cloudflare analytics docs*. (n.d.). *Cloudflare Docs*. <https://developers.cloudflare.com/analytics/graphql-api/features/filtering>.

Отримано 30.01.2025

UDC 004.415.53

Pavlo Zinchenko ¹, Dmytro Mekhed ²

¹PhD Student at the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: zinchenkop@protonmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4573-6463>. ResearcherID: [MDS-7976-2025](https://orcid.org/0009-0001-4573-6463)

²PhD in Pedagogy, Associate Professor of the Department of cybersecurity and mathematical simulation
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: d.mekhed@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3905-3620>

ResearcherID: [H-1751-2016](https://orcid.org/0000-0003-3905-3620). SCOPUS Author ID: [57193823626](https://orcid.org/0000-0003-3905-3620)

OPTIMIZATION OF GraphQL QUERIES

Presented in the article information is an overview. Many companies use several service providers to provide their services to customers. Sometimes it is not enough to have basic monitoring in centralized monitoring systems, so companies need to set up the custom API integration for monitoring. To collect REST API data is the main option, but usually leads to many requests and a huge amount of useless data. GraphQL API as modern replacement for REST API could solve these problems, but only with the correct optimization. For effective monitoring using the GraphQL API, it is necessary to optimize queries, because unoptimized queries could lead to monitoring tools overload and long timing of data processing. The purpose of the article is to review practical ways to optimize GraphQL API requests from the client part using the example of popular CDN provider Cloudflare. This article shows ways to optimize GraphQL API queries by "filtering" and "querying multiple data nodes". Based on examples of using the Cloudflare GraphQL API, these two optimization ways were manually analyzed. The "filtering" optimization allows reducing the amount of useless data received and avoiding data loss in some cases. The "querying multiple data nodes" optimization reduces the number of requests to the API and allows to get information from several parts of the API. Relevance of understanding limitations of service providers and correct formation of the GraphQL filters in queries are also analyzed within the article, because it could lead to the situation when data from the query will be duplicated. The article includes the actual example of optimizing GraphQL queries that confirms effective reviewed optimization methods — these methods allowed to speed up query execution and reduce the amount of information to be processed by several times. As a result, a correct GraphQL requests optimization increases effectiveness, accuracy and completeness of collected information.

Keywords: optimization; monitoring; query; Cloudflare; API integration.

Table: 1. References: 8.

Юрій Іванович Підліснийаспірант кафедри кібербезпеки та математичного моделювання
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)E-mail: ypodlesny@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9783-3898>. ResearcherID: [LSL-1170-2024](https://orcid.org/0009-0001-9783-3898)**АУДИТ МЕРЕЖ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ:
ОЦІНКА ВРАЗЛИВОСТЕЙ ТА ЗАХИСТ ВІД КІБЕРНАПАДІВ**

У статті представлено результати дослідження питань безпеки Інтернету речей (IoT), аналізу ризиків та проведенню аудиту IoT-систем. Розглянуто ризики, пов'язані з використанням IoT-пристроїв, які виникають через недостатній рівень безпеки, відсутність єдиних стандартів та складність управління великими мережами. Особлива увага приділяється аудиту IoT-систем, який дозволяє ідентифікувати слабкі місця в інфраструктурі та мінімізувати можливі загрози. У статті запропоновано різні підходи до аудиту, зокрема проактивний, який спрямований на запобігання ризикам ще на етапі розробки та впровадження системи. Також проаналізовано можливі архітектури IoT (централізовані, децентралізовані, гібридні) та їхній вплив на загальну безпеку системи. Особлива увага приділена методології управління ризиками, яка може бути адаптована до потреб IoT. У статті наведено рекомендації щодо впровадження більш ефективних методів захисту, розробки нових стандартів та комплексного підходу до безпеки IoT-систем. Основна мета – створення надійної, безпечної та масштабованої екосистеми IoT, яка відповідає сучасним викликам.

Ключові слова: Інтернет речей; безпека IoT; IT аудит систем; управління ризиками; архітектура IoT; захист даних; кіберзагрози, стандарти безпеки; вразливості мереж; протидія атакам; моніторинг; кібербезпека; проактивні методи.

Рис.: 5. Бібл.: 12. Табл.: 1.

Актуальність теми дослідження. Відзначається стрімке зростання популярності технологій Інтернету речей (IoT), які стають невід'ємною частиною сучасного суспільства, охоплюючи різноманітні сфери – від побутових пристроїв до промислових систем. Разом із цим зростає кількість кіберзагроз, які ставлять під ризик конфіденційність, цілісність і доступність даних. Вразливості в архітектурі IoT мереж, обмеженість ресурсу пристроїв та недостатня адаптація стандартів безпеки роблять цю сферу критично важливою для досліджень. Забезпечення надійного захисту IoT мереж потребує розробки ефективних методів виявлення вразливостей та протидії кіберзагрозам, що є важливим для підтримки довіри користувачів та стабільності цифрової інфраструктури.

Постановка проблеми. У зв'язку з бурхливим розвитком Інтернету речей (IoT), безпека таких мереж стає однією з найважливіших проблем. Зростаюча кількість підключених пристроїв і взаємодія між ними створюють численні точки вразливості, що може призвести до різноманітних кіберзагроз. Аудит безпеки є необхідним інструментом для виявлення цих вразливостей і оцінки рівня загроз в IoT-мережах. Проблема полягає в тому, що традиційні методи аудиту безпеки не завжди ефективні для таких складних і динамічних мереж. Потрібні нові методики та підходи, що здатні враховувати специфіку IoT-середовища, зокрема різноманітність пристроїв, їхні обмежені ресурси, а також специфічні загрози, що виникають внаслідок їх взаємодії. Виявлення вразливостей і розробка заходів для протидії кіберзагрозам стають критично важливими для забезпечення належного рівня безпеки в таких мережах.

Таким чином, постає потреба в розробці ефективних методів аудиту, які дозволяють оперативно виявляти вразливості в мережах IoT, оцінювати рівень кіберзагроз та розробляти стратегії для їх нейтралізації, що дозволить забезпечити надійний захист і безпечну роботу таких технологій в умовах сучасних загроз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження у сфері аудиту безпеки IoT зосереджуються на розробці нових методів для виявлення вразливостей у пристроях та мережах IoT. Вивчення зростаючої кількості кіберзагроз вимагає інтеграції сучасних технологій, таких як машинне навчання, штучний інтелект та аналіз великих даних для автоматичного виявлення аномалій та загроз. Багато робіт досліджують різні методи шифрування,

безпечну автентифікацію та протоколювання даних, щоб зменшити ймовірність атак. Окремо підкреслюється важливість безперервного моніторингу та аналізу мережевої активності для своєчасного виявлення та нейтралізації потенційних кіберзагроз.

Так, деякі автори [1] дають огляд безпекових проблем, з якими стикаються IoT-системи, зокрема, з погляду можливих загроз для приватності користувачів і конфіденційності даних. Авторами запропоновано кілька підходів для захисту IoT, включаючи використання блокчейн-технологій для створення безпечних і децентралізованих платформ для управління даними. У статті [2] автори зосереджуються на специфіці безпеки та конфіденційності в IoT-системах, які використовуються в "розумних містах". Вони розглядають загрози, які можуть виникнути через масове використання сенсорів, що підключаються до мереж. Пропонується кілька рішень для захисту таких мереж, зокрема, використання інтелектуальних методів для моніторингу та запобігання атак.

Загалом різні автори підкреслюють необхідність адаптації чинних стандартів безпеки до специфіки IoT, враховуючи обмеження пристроїв та високий рівень взаємодії між різними платформами. Безпека в IoT повинна охоплювати різні рівні: пристрої, мережі, хмарні системи та взаємодію між ними. Проблеми приватності [3] і довіри в IoT стають критичними, оскільки зростає кількість даних, які передаються між пристроями. Авторі наголошують на необхідності створення політик довіри, які дозволяють забезпечити не лише технічний захист, а й соціальний контекст взаємодії користувачів з технологіями.

Однак більшість досліджень акцентують увагу на проблемах інтеграції безпеки в існуючі інфраструктури IoT, що включає забезпечення сумісності різних протоколів і платформ без шкоди для їхньої продуктивності та функціональності.

Виділення недосліджених проблем. Однією з ключових проблем, яка залишається недослідженою, є розробка ефективних методів аудиту безпеки в реальному часі для мереж IoT. Існуючі методи здебільшого орієнтовані на постійне або періодичне сканування мережі, що не завжди забезпечує своєчасне виявлення нових загроз або вразливостей, особливо в умовах динамічного середовища IoT.

Недостатньо дослідженою залишається інтеграція різних стандартів безпеки для створення єдиної системи аудиту.

Відсутні ефективні методи для захисту від багатокрокових атак, які використовують кілька вразливостей.

Немає достатньо розроблених методів для автоматизації аудиту безпеки в IoT-мережах.

Мета статті. Створити тестову модель мережі IoT, вибрати методологію проведення аудиту й показати в рамках об'єму цієї статті, які конкретні етапи проведення аудиту були застосовані і які результати були отримані.

Виклад основного матеріалу. Поняттю Інтернет Речей (далі - IoT) вже 25 років, але найбільше розповсюдження він почав набувати останні 10 років. Термін IoT можна охарактеризувати як об'єднані за допомогою даних в одну мережу об'єктів, які контролюються іншими пристроями або серверами. Зв'язок між об'єктами, мережами або людьми включає як явні (свідомі) дії від одного пристрою IoT до іншого так і не явні (несвідомі). Головна відмінність IoT в тому, що вплив людини на ці пристрої зменшений або відсутній.

На думку багатьох дослідників, IoT змінить кардинально суспільство, як і Інтернет [4]. IoT дозволяє еволюціонувати існуюче середовище з новими функціями, такими як створення «розумних» міст, мереж і різних автоматизованих середовищ. Використання IoT майже в усіх сферах людського буття створює багато переваг, але також і серйозних викликів, пов'язаних з безпекою та надійністю пристроїв, а також порушує серйозні етичні проблеми. Стрімка еволюція технологій, поширення автоматизації різноманітних процесів потребує дедалі більшого використання IoT, а їхнє операційне середовище стає

дедалі складнішим. Досить поширеними є ситуації, коли виробники підключають різноманітні пристрої IoT, прагнучи максимально автоматизувати процеси системи або середовища, але не приділяючи достатньої уваги безпеці цих пристроїв. Можна констатувати, що велике різноманіття розумних пристроїв робить складною задачу аудиту безпеки з поточними інструментами управління ризиками, а в деяких випадках серйозні ризики безпеки можуть бути невиявлені взагалі.

Так у [5] звернено увагу на проблеми, що виникають через відсутність захисту безпеки в системах Інтернету речей, а саме питання стандартизації, масштабування, конфіденційності, фізичної безпеки. У [6] зазначено, що при впровадженні нових екосистем (які використовують IoT) можливо не помітити наявних ризиків, які виникають через поглиблені зв'язки різних систем, різних стандартів передачі даних і різних стандартів шифрування. З іншого боку, для успішного аудиту системи й оцінки ризиків необхідно повне розуміння мережевого середовища системи, але, враховуючи вищезазначене, в мережах з використанням IoT деякі аспекти функціонування мережі часто невідомі або невизначені.

Взагалі інформаційна безпека систем, згідно з [4, с. 294], складається з таких проблемних аспектів що необхідні для керування ризиками (рис. 1): безпека програмного забезпечення, фізична безпека, контроль доступу, плани відновлення, аудит і моніторинг журналів, запобігання несанкціонованому доступу, безпека й конфіденційність даних.



Рис. 1. Безпека інформаційної системи

Джерело: розроблено автором.

Якщо аналізувати проблематику безпеки інформаційних систем з використанням пристроїв IoT, можна виділити наступне.

Наразі дедалі більше розповсюдження має так звана платформа IoT, коли за допомоги програмного забезпечення створюється спільна екосистема між пристроями і хмарними сервісами. Вона дозволяє передавати дані з різних пристроїв IoT безпосередньо на платформу сервісу для використання. Оскільки платформи IoT обробляють і містять величезну кількість даних, пристроїв та інформації про них, виникає багато питань, пов'язаних з безпекою та управлінням ризиками. З погляду обслуговування постійним викликом для хмарних сервісів IoT є підтримка належного рівня безпеки, наприклад, з позиції стандартизації, а також забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності платформ. Кожна платформа IoT переважно має різноманітні розумні датчики, які виробляються різними виробниками і які контактують та взаємодіють між собою у міждоміненний спосіб і звісно мають геть різні стандарти безпеки. У [7] автори зазначають, що платформи IoT також стикаються із загрозою різних типів дешевих датчиків. Платформи Інтернету речей зберігають, передають і розподіляють дані, що можуть включати конфіденційну інформацію, і коли йдеться про використання сотень або навіть тисяч IoT-пристроїв, важливо, щоб дані з датчиків можна було ефективно контролювати й управляти ними.

Великим викликом є також функціональні проблеми нестандартних гетерогенних інтерфейсів які використовуються для об'єднання пристроїв IoT з хмарними сервісами (тобто маємо різноманітні мережеві інтерфейси через які і взаємодіють розумні пристрої), деякі дослідники також зазначають що «Пристрої Інтернету речей не призначені для ефективної міжмашинної комунікації через мережеві накладні витрати, мережеві затримки та різні проблеми з обробкою даних» [8]. Іншою проблемою пристроїв IoT став їхній швидкий розвиток, який випереджає сумісні технології і виробники не в змозі створити загальні стандарти і правила безпеки.

На думку авторів [9] ризики життєвого циклу пристроїв Інтернету речей, пов'язані з мінімізацією кіберризиків, повинні регулярно переглядатися. Зменшення цих ризиків також вимагає інтеграції даних, процесів, пристроїв і систем у систему управління ризиками.

Управління ризиками має першорядне значення для культури безпеки, особливо коли мова іде про взаємозв'язок різних систем, а саме пристрої IoT утворюють великий набір різних зав'язків. Однак для підтримки зав'язків недостатньо лише протоколів і стандартів зв'язку, а необхідна багаторівнева співпраця між різними суб'єктами. Ця співпраця буде зосереджена на способах обробки та отримання даних.

Можна констатувати, що «без чітких керівних принципів для пристроїв і систем Інтернету речей, таких як нормативно-правові акти та загальні стандарти, нерегульовані питання негативно впливатимуть на промисловість» [10].

За останнє десятиліття Міжнародна організація стандартизації (ISO) провела багато досліджень, намагаючись визначити потенційні економічні вигоди від стандартизації для компаній, що використовують технології, які швидко розвиваються, але наразі стандартизація безпеки пристроїв IoT має фрагментарний характер.

Можливо припустити, що нові типи технологій створюють більше нових ризиків, які існуючі системи оцінки та управління не здатні передбачити. Деякі дослідники зазначають, що існуючі системи безпеки не підходять для регулярних оцінок безпеки, оскільки інтерфейси між різними системами, що містять пристрої Інтернету речей, невідомі під час оцінки безпеки систем [9].

Взагалі при проведенні аудиту пристроїв IoT, а саме перевірки системи на відповідність набору правил безпеки, виникає перша проблема навіть в визначенні «відповідність набору правил безпеки». Існуючі стандарти і навіть найновітніший ISO/IEC 27400, містять загальні положення для впровадження безпеки IoT і запроваджують ризик орієнтований підхід для проведення аудиту безпеки. Загалом можна констатувати, що стандарти охоплюють так званий високий рівень даних, але саме низкорівневі системні дані, отримані, наприклад, від скомпрометованого датчика диму, температури тощо можуть містити загрозу для всієї високорівневої системи.

Також при проведенні аудиту IoT систем треба бути готовим до відсутності так званого автономного аудиту (коли пристрої ведуть журнали самодіагностики або взагалі мають журнали з логуванням критичних подій), оскільки пристрої можуть не мати достатніх ресурсів для таких операцій. І не менш значущою проблемою є так звана вибірка даних для аудиту. Одні дослідники дають рекомендації для перевірки мобільного додатку (який управляє системою IoT), аналіз мережевого трафіку на предмет вторгнень, аналіз даних з різноманітних датчиків, що контролюють процеси аутентифікації та авторизації [11], але на практиці збір такої кількості різноманітної інформації і перевірки її на правила безпеки (також слід врахувати, що для різних підсистем IoT і навіть автономного пристроїв-різні стандарти безпеки), буде досить виснажливим процесом. На рис. 2 зображені основні проблеми проведення аудиту систем IoT.



Рис. 2. Основні проблеми проведення аудиту пристроїв IoT

Джерело: розроблено автором.

Сучасні методології аудиту безпеки можна розділити на ретроактивні, інкрементні та проактивні.

Ретроактивний підхід використовується для розслідування фактів зламу систем, аналізу їхніх причин і наслідків. Хоча він не здатен запобігти втраті даних або відмові в обслуговуванні, результати такого аналізу слугують основою для вдосконалення безпеки майбутніх систем.

Інкрементний підхід передбачає поетапне тестування або аудит системи з акцентом на ті компоненти, які зазнають змін або мають критичний вплив на цілісність, безпеку та ефективність. Цей підхід виявляється особливо ефективним у випадку динамічних систем із регулярними оновленнями, де базовим припущенням є стабільність поточної версії та відсутність критичних вразливостей перед впровадженням змін.

Проактивний підхід базується на запобіганні проблемам і ризикам до їх виникнення, а не на реагуванні на вже наявні загрози чи інциденти. У контексті інформаційної безпеки та IoT-мереж, він передбачає аналіз можливих слабких місць, прогнозування потенційних атак та впровадження попереджувальних заходів.

Для кращого розуміння методів аудиту IoT, необхідно представити архітектуру систем на базі IoT. Як зазначалось вище, пристрої IoT взаємодіють через гетерогенні системи, тому для забезпечення масштабованості, максимальної інтеграції і зниження вартості, використовується відкрита архітектура (тобто для проведення аудиту ми маємо доступ до інтерфейсів і компонентів).

У будь-якому разі, ці архітектури повинні відповідати вимогам безпеки, представленим на рис. 1, особливо цілісність, конфіденційність, доступність.

Найчастіше, на думку дослідників [12], використовуються три архітектури IoT:

- централізована архітектура, коли всі датчики, сенсори й інші пристрої IoT через шлюзи підключені до хмарної платформи, яка обробляє всі дані, керує пристроями й ухвалює рішення. Класичним прикладом є концепція «розумного дому» або навіть «розумного міста».

- децентралізована архітектура IoT, на відміну від вищезгаданої, обробка даних і ухвалення рішень розподілена між кількома вузлами.

- гібридна архітектура IoT поєднує особливості централізованої та децентралізованої архітектур для досягнення балансу між ефективністю обробки даних, масштабованістю та надійністю. У цій моделі частина функцій виконується централізовано (наприклад, обробка великих даних), тоді як інші функції розподіляються між пристроями (обробка локальних даних).

На рис. 3 зображена детальна гібридна архітектура пристроїв IoT, а саме хмарний сервер (який має декілька рівнів: додатки; файлове сховище; рівень керування зв'язком; каналний рівень, або протоколи зв'язку) та пристрої IoT, для яких передбачено такі рівні: додатки; проміжне ПЗ; протоколи керування (наприклад датчиками); операційна система (необов'язкова присутність); каналний рівень (представлений найбільш поширеними протоколами зв'язку для IoT).

Нині немає жодного документа, як провести аудит IoT систем і проаналізувати її безпечність, тому пропонується:

1. Застосувати проактивний підхід для проведення аудиту, спираючись на те, що ми, як правило маємо новітні системи, або які запроваджується вперше, тому важливо передбачити інциденти безпеки, провести так званий стрес-тест усієї системи і проаналізувати результати.
2. Будемо вважати, що на сьогодні більшість архітектур мають гібридну топологію, адже вона поєднує переваги інших.
3. Для полегшення аудиту проведемо декомпозицію системи та розіб'ємо архітектуру на складові:

- пристрій IoT (наприклад, датчик, привід, смартфон);
- мережа (наприклад, локальна мережа, Інтернет);
- хмара: платформа для зберігання, обробки та аналізу даних;
- канали зв'язку: wi-fi, супутниковий зв'язок, ZigBee, NFC, BT тощо.

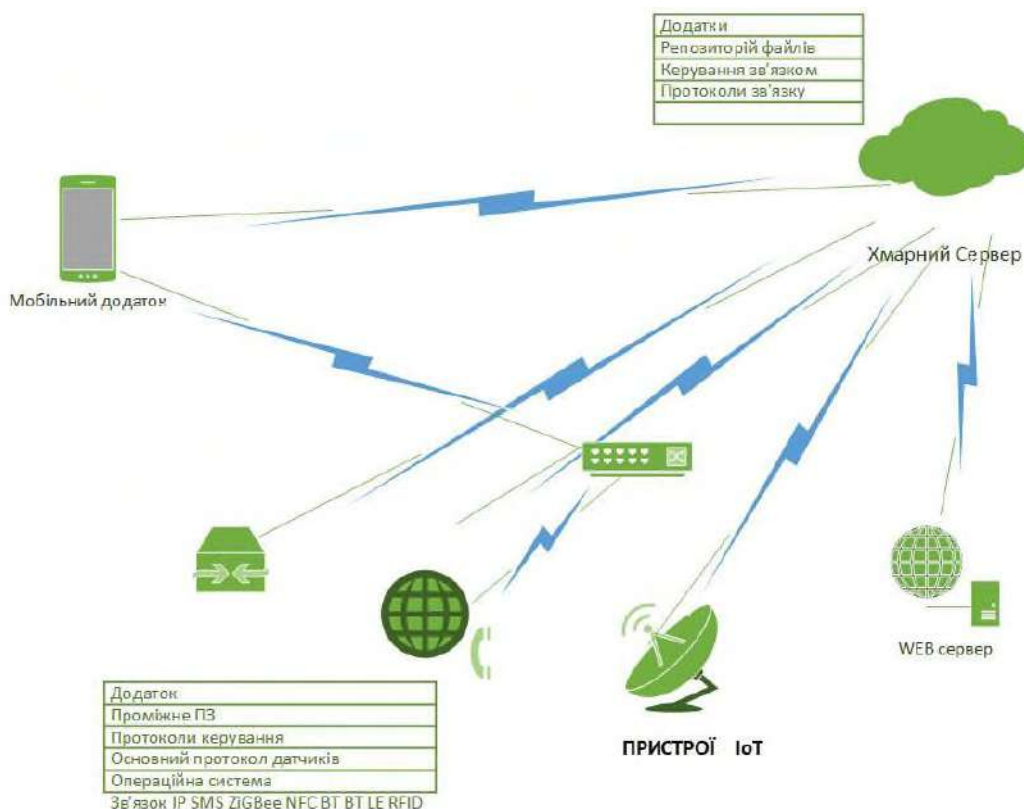


Рис. 3. Гібридна архітектура пристроїв IoT

Джерело: розроблено автором.

Наступним кроком після визначення проактивного підходу для проведення аудиту гібридної IoT системи необхідно визначити методологію управління ризиками, яка і допоможе знайти слабкі місця на всіх рівнях (пристрої, мережа, хмара), а головне дасть змогу зрозуміти, які ризики мають найбільший вплив на систему взагалі.

Наразі в контексті IoT можна використовувати такі стандарти:

1) **ISO/IEC 27005** – міжнародний стандарт, визначає процеси ідентифікації активів, оцінки загроз і вразливостей, аналізу ризиків і управління ними, він тісно інтегрується з ISO/IEC 27001. Головний недолік – його широке застосування для різноманітних систем, в контексті IoT не завжди враховує специфіку;

2) **NIST RMF** (Risk Management Framework) - рамкова методологія, створена Національним інститутом стандартів і технологій США, яка найбільш популярна для критичної інфраструктури і державних проєктів. Складається з шести ключових етапів, від категоризації системи до моніторингу контролів. Головні недоліки – значна ресурсозатратність і як і в стандарті ISO/IEC 27005 вимагає адаптації в контексті систем IoT;

3) **OCTAVE** (Operationally Critical Threat, Asset, and Vulnerability Evaluation) - методологія, розроблена CERT, яка фокусується на оцінці ризиків та управлінні вразливостями. Це найбільш проста в провадженні методологія, оскільки вона фіксується на організаційних ризиках, але це і її головний недолік - відсутність технічних аспектів виявлення загроз;

4) **EBIOS** (Expression des Besoins et Identification des Objectifs de Sécurité) – це методологія управління ризиками, яка розроблена Агентством з кібербезпеки Франції (ANSSI). Її основна мета — ідентифікація, аналіз і оцінювання ризиків інформаційної системи з позиції її безпеки. Підходить для складних гібридних систем і зосереджується на практичності, а саме на реальних загрозах і методах їх вирішення. Недоліки, складність і ресурсозатратність;

5) **FAIR** (Factor Analysis of Information Risk) - методика, що дозволяє оцінювати фінансовий вплив ризиків. Головний недолік – кількісний аналіз на шкоду якісному;

6) **COBIT** (Control Objectives for Information and Related Technologies) - методологія, яка добре підходить для великих організацій через універсальність, але для систем IoT буде потрібна значна адаптація;

7) **CRAMM** (CCTA Risk Analysis and Management Method) - методика, розроблена британським урядом для аналізу ризиків інформаційної безпеки. Головна перевага – можливість проведення глибокого аудиту. Головні недоліки – складність впровадження і орієнтованість на «класичні» інформаційні системи.

З вищепредставлених стандартів, з погляду автора, найбільш підходить для IoT - **EBIOS, через його відповідність стандартам ISO/IEC 27005 та ISO/IEC 31000 і можливості аналізувати ризики не тільки на технічному рівні, а й на рівні організаційних процесів і зовнішнього середовища.**

Для проведення більш конкретних досліджень побудуємо типову гібридну модель пристроїв IoT з базовими операціями, які дуже схожі на більшість існуючих платформ (рис. 4). Представимо таку архітектуру:

1) пристрої IoT: різноманітні розумні датчики (вологості, температури, руху, диму), які підключені через шлюзи;

2) шлюзи - обробка і передача даних до хмари;

3) хмара - забезпечує обробку даних, аналіз Big Data, машинне навчання;

4) локальний сервер - резервує дані, забезпечує доступ у разі втрати зв'язку з хмарою;

5) мобільний додаток - моніторинг і управління IoT пристроями.

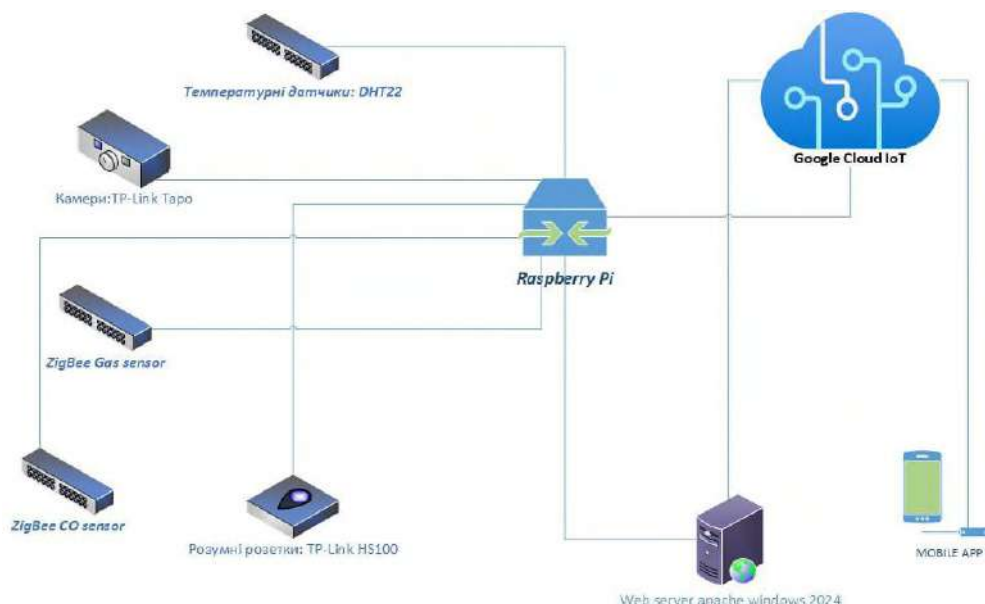


Рис. 4. Тестова гібридна модель IoT системи з реальними компонентами
Джерело: розроблено автором.

Для оцінки адекватності та точності запропонованої IoT-моделі порівняємо її з реальними IoT-платформами (Google Cloud IoT, AWS IoT) та вимогами ISO/IEC 30141:2024.

Таблиця 1 – Відповідність запропонованої IoT-моделі вимогам стандарту ISO/IEC 30141:2024 і провідним IoT-рішенням

Компонент	Наша IoT-модель	Вимоги ISO/IEC 30141:2024	Google Cloud IoT	Microsoft Azure IoT	AWS IoT	Відповідність
1	2	3	4	5	6	7
Рівень пристроїв (Perception Layer)	Zigbee-датчики (газ, CO, температура)	Використання сенсорів та актуаторів для збору даних	Підтримка різних сенсорів для збору даних через Bluetooth, Zigbee, LoRa	Підтримка сенсорів для різних типів даних, таких як температура, вологість, газ	Підтримка широкого спектра сенсорів для моніторингу навколишнього середовища	✓ Відповідає
Рівень мережі (Network Layer)	Wi-Fi, Ethernet, Zigbee,	Надійні мережеві протоколи з безпекою (наприклад, MQTT з TLS)	Використовує надійні протоколи для передачі даних через MQTT, HTTP, TLS	Використовує MQTT, HTTPS, AMQP для передачі даних, забезпечує високий рівень безпеки	Підтримка безпечних протоколів: MQTT, HTTPS, TLS для захисту даних	✓ Відповідає
Рівень шлюзів (Edge Layer)	Raspberry Pi для обробки даних	Використання периферійних обчислень для зменшення затримок	Використовує периферійні пристрої для обробки даних, такі як Google Edge TPU	Підтримка периферійних обчислень за допомогою Azure IoT Edge та спеціальних шлюзів	AWS IoT Greengrass для обробки даних на периферії	✓ Відповідає

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Рівень управління (Control Layer)	Центр. управління	Потрібно централізоване управління для моніторингу та контролю	Центральне управління через Google Cloud IoT Core для моніторингу пристроїв	Azure IoT Hub для централізованого управління пристроями та моніторингу	AWS IoT Core для централізованого управління пристроями	✓ Відповідає
Рівень хмари (Application Layer)	Google Cloud IoT для обробки даних	Використання хмарних платформ для аналітики	Використовує Google Cloud IoT для аналітики даних та їх збереж.	Azure IoT для аналітики даних, зберігання та інтеграції з іншими системами	AWS IoT для збору, зберігання, аналізу даних та інтеграції з іншими сервісами	✓ Відповідає
Безпека	Аутентифікація	Аутентифікація, контроль доступу, захист даних	Вбудована безпека через шифрування, аутентифікацію	Azure IoT забезпечує безпеку через шифрування та контроль доступу	Високий рівень безпеки за допомогою аутентифікації, шифрування та моніторингу	✓ Відповідає
Масштабованість	Локальна обробка на Raspberry Pi	Використання масштабованих рішень	Google Cloud IoT забезпечує масштабованість для обробки великих обсягів даних	Azure IoT забезпечує безперешкодну масштабованість для зростаючих обсягів даних	AWS IoT дозволяє легко масштабувати систему з додаванням нових пристроїв	⚠ Частково відповідає (рекомендується хмарна масштабованість)

Згідно з табл. 1 можна зробити висновок, що запропонована IoT-модель загалом відповідає стандарту *ISO/IEC 30141:2024* та має багато спільних рис із реальними комерційними IoT-рішеннями, такими як *Google Cloud IoT*, *Microsoft Azure IoT* та *AWS IoT*. Вона використовує ефективні сенсори для збору даних, периферійні обчислення для зменшення затримок та хмарні технології для обробки інформації, що є ключовими елементами сучасних IoT-систем. Модель є адекватною та точною, адже вона базується на сучасних принципах побудови IoT-систем і може бути вдосконалена відповідно до кращих практик без значних змін у своїй архітектурі.

Проаналізуємо ризики моделі на рис. 4 за методологію EBIOS і створимо для тестування вказану модель в MATLAB. Хочемо зазначити, що мета цього аналізу показати конкретні етапи проведення аудиту IoT систем за вибраною методологією і отримання загальних рекомендацій про усунення виявлених недоліків. Створення і тестування вказаною моделі в MATLAB, допомагає зрозуміти й отримати в реальному часі дані про вплив атак на пристрої, а також наскільки ефективні способи захисту.

Для створення моделі будемо використовувати Simulink і Communications Toolbox. *Simulink* буде використаний для моделювання динаміки системи, побудови моделі IoT мережі та взаємодії між пристроями, а також для аналізу поведінки в умовах кібернападів і захисту. *Communications Toolbox* буде застосований для моделювання комунікаційних протоколів в IoT мережах, а також для аналізу сигналів, шумів та інших аспектів передачі даних у цих мережах, що дозволяє детальніше оцінювати вплив кіберзагроз на зв'язок.

Етап 1: Контекст і цілі безпеки:

- **Контекст:** гібридна IoT-система для розумного будинку. **Розумні сенсори** збирають дані (наприклад, температура, вологість, відео зображення), **розумний шлюз** здійснює попередню обробку даних перед передачею до хмари, хмара обчислює великі дані, вебсервер відображає дані та забезпечує управління системою через вебінтерфейс, а кінцевий споживач отримує інформацію на смартфоні.

- **Цілі:** забезпечення конфіденційності даних, захист від зловмисників, стійкість до атак.

- **Критичні активи:** особисті дані користувачів, доступ до пристроїв, стабільність і цілісність системи.

Етап 2: Ідентифікація загроз

- **Потреби IoT системи:**

- **Конфіденційність:** захист від перехоплення або підробки даних (наприклад, під час передачі через шлюз).

- **Цілісність:** дані повинні залишатися незмінними на всіх етапах обробки.

- **Доступність:** система має продовжувати роботу навіть під час загроз (DoS-атаки).

- **Загрози:**

- **Загрози до сенсорів:** підміна даних через фізичний доступ, некоректні вимірювання через зовнішні впливи (шум, саботаж).

- **Загрози до шлюзу:** атаки типу "чоловік посередині" (MitM), які порушують цілісність та конфіденційність даних (розрив з'єднання на дві частини, створюючи своє власне зашифроване з'єднання з Mobile APP й з сервером, до якого звертається користувач), затримки або втрати даних через перевантаження мережі.

- **Загрози до хмари:** відмова у наданні послуг (DDoS-атаки), несанкціонований доступ до збережених даних.

- **Загрози до користувача:** виведення некоректної інформації (помилки у виявленні аномалій), порушення приватності через злом додатків або вебсерверів.

Етап 3: Вразливості

Сенсори найбільш вразливі через відсутність фізичного захисту, а також через недостатнє калібрування.

Дані шлюзу можливо перехопити через недостатнє шифрування даних, а відсутність резервних маршрутів для даних може бути причиною великих затримок у передачі або повної її зупинки.

Несанкціонований доступ до хмари можливо отримати через слабку аутентифікації (відсутність двофакторної, слабкі паролі), а також через відсутність моніторингу аномалій.

Етап 4: Аналіз впливу

Некоректні рішення на основі змінених або підроблених даних (наприклад, зміна показників температури) напряму впливає на цілісність усієї системи.

Витік даних може нести конференційну інформацію про користувача (злом камери відеонагляду).

Проблеми зі шлюзом або хмарою призведуть до тимчасових затримок або повної втрати даних.

Якщо розглядати ці загрози, найбільш небезпечною є ймовірність ухвалення рішень на основі спотворених або недостовірних даних (наприклад, датчик дає неправильну інформацію про температуру і так не буде виявлена пожежа), а також витік конференційної інформації. Середня загроза або навіть низка-затримка в передачі інформації.

Етап 5: Контрзаходи (загальні рекомендації)

Цей етап формується на основі попередніх етапів.

Для сенсорів необхідно впровадити фізичну безпеку (розміщення у недоступних для саботажу місцях), а також можливість самодіагностики сенсорів (калібрування тощо).

Для шлюзу використовувати найбільш стійких протоколів шифрування передачі даних і резервування каналів передачі.

Хмара повинна мати мультифакторну автентифікацію та постійний моніторинг активності.

Користувач системи повинен дотримуватись політики паролів і регулярно проводити рекомендовані оновлення.

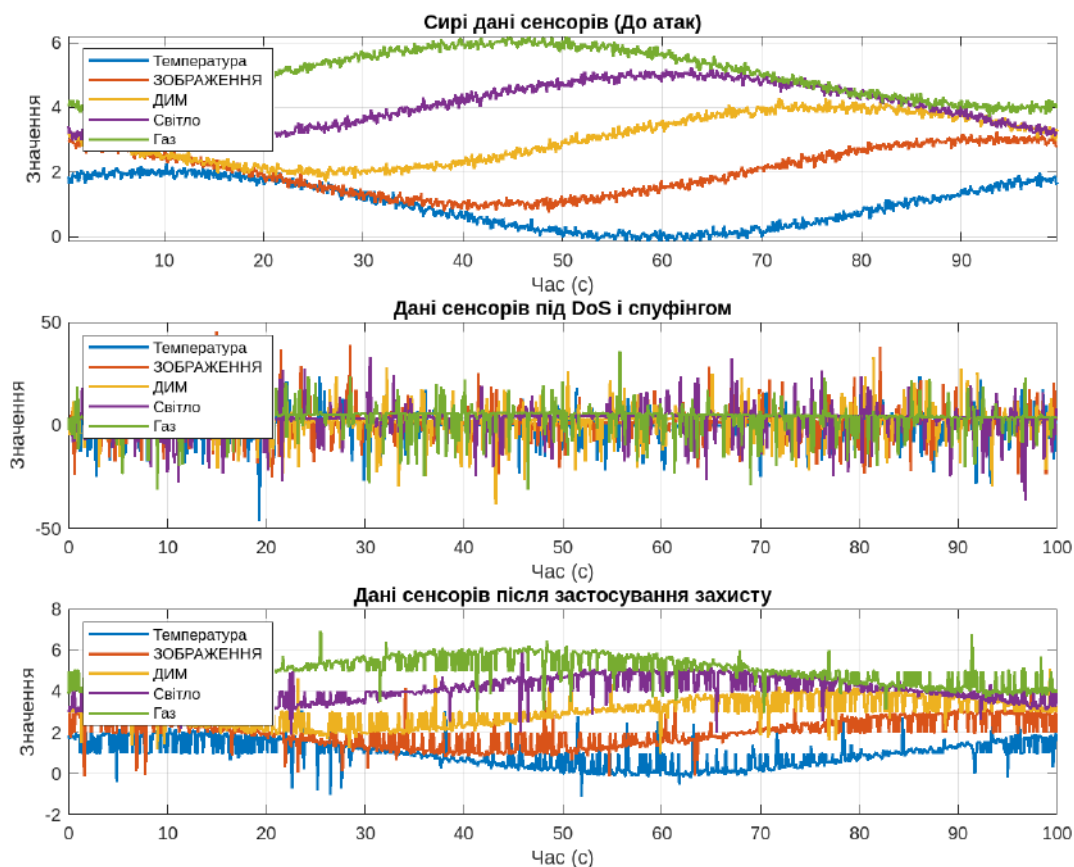


Рис. 5. Дані розумних датчиків під атакою з захистом і без посилання
Джерело: розроблено автором.

Наступним практичним кроком є створення тестової мережі IoT, яка була представлена на рис. 4, у програмному комплексі MATLAB. Проаналізувавши ризики по методології EBIOS, нам вже відомо, що розумні датчики найбільш незахищені перед DOS атаками і спуфінгом і через такі вторгнення виникають ризики втрати даних або їх підміни (фальсифікації). Як приклад, у нашій моделі відбувається симуляція DoS-атаки+спуфінг і для того щоб зрозуміти як впливають на наші розумні сенсори різноманітні аномалії, були створені відповідні графіки (рис. 5).

Перший графік демонструє сирі дані графіків, дані мають певну періодичність, згенеровано синусоїдальною функцією, що імітує нормальні показники сенсорів (наприклад, температура, рівень газу тощо), всі дані виглядають відносно стабільними, але з деяким флуктуаціями через шум.

Другий графік демонструє дані після атаки, маємо втрачені дані внаслідок DoS-атаки - пропуски або "пусті" ділянки на графіку, де дані відсутні. Це підтверджує, що система під час DoS-атаки втрачає важливу інформацію. Деякі дані будуть значно вищими або нижчими за очікувані значення, що вказує на підробку даних (спуфінг). Це може спричинити хибне інтерпретування інформації в реальній системі.

Третій графік показує дані датчиків після застосування захисних механізмів. Після інтерполяції графіки виглядають більш гладкими і без пропусків, що свідчить про те, що система здатна "заповнювати" втрачені дані і захист від DoS-атаки дієвий. Аномальні зміни, викликані підробленими даними, замінені на значення, що більше відповідають очікуваному діапазону. Це зменшує ефект спуфінга, і графік набуває більш природного вигляду.

Підсумовуючи тести, можна зауважити, що був розглянутий приклад аудиту типової гібридної IoT системи за допомогою комбінації програмного комплексу MATLAB і методології для аналізу ризиків EBIOS. Ця синергія показала себе з найкращої сторони й виявила такі комбінації взаємодії одне з одним:

- за допомогою EBIOS створюються загрозові сценарії, які імплементуються в MATLAB для симуляції;
- MATLAB забезпечує візуалізацію наслідків атак, а EBIOS аналізує залишкові ризики й рекомендує покращення для безпеки;
- використовуючи моделі, створені в MATLAB і EBIOS, можна постійно покращувати IoT-систему, додаючи захисні механізми.

Узагальнюючи, така інтеграція дозволяє як аналітикам безпеки, так і інженерам ефективно тестувати, моделювати та вдосконалювати гібридні IoT-системи.

Висновки. У статті наведені і проаналізовані сучасні методології проведення аудиту IoT мереж. Наданий опис типової гібридної архітектури, обґрунтований вибір застосування проактивного підходу і методології управління ризиками. Створення тестової моделі, дозволило продемонструвати етапи проведення аудиту з практичного погляду, а також виявити й описати загрози, їхній вплив і контрзаходи. Результати, що були отримані й візуалізовані у графіках, демонструють, як кібератаки і захист від них, можуть впливати на дані, що генерують розумні пристрої.

Регулярне проведення аудиту та тестування IoT-мереж, надважливо, для запобігання кіберзагрозам і захисту критично важливих даних.

Список використаних джерел

1. Yang, Y., Wu, L., Yin, G., Li, L., & Zhao, H. (2017). A Survey on Security and Privacy Issues in Internet-of-Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(5), 1250–1258. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2694844>.
2. Assiri, A., & Almagwashi, H. (2018). IoT security and privacy issues. U *1st international conference on computer applications & information security (ICCAIS)* (s. 1–5). <https://doi.org/10.1109/CAIS.2018.8442002>.
3. Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2015). Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*, 76, 146–164. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.11.008>.
4. Atlam, H. F., & Wills, G. B. (2019). IoT security, privacy, safety and ethics. U *Internet of things* (s. 123–149). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18732-3_8.
5. Oracevic, A., Dilek, S., & Ozdemir, S. (2017). Security in Internet of things: A survey. U *2017 international symposium on networks, computers and communications (ISNCC)* (s. 1–6). <https://doi.org/10.1109/ISNCC.2017.8072001>.
6. Nurse, J. R. C., Creese, S., & De Roure, D. (2017). Security risk assessment in internet of things systems. *IT Professional*, 19(5), 20–26. <https://doi.org/10.1109/mitp.2017.3680959>.
7. DiMase, D., Collier, Z. A., Heffner, K., & Linkov, I. (2015). Systems engineering framework for cyber physical security and resilience. *Environment Systems and Decisions*, 35(2), 291–300. <https://doi.org/10.1007/s10669-015-9540-y>.
8. Botta, A., de Donato, W., Persico, V., & Pescapé, A. (2016). Integration of cloud computing and internet of things: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 56, 684–700. <https://doi.org/10.1016/j.future.2015.09.021>.
9. Radanliev, P., Roure, D. C. D., Nurse, J., Montalvo, R. M., & Burnap, P. (2019). Supply chain design for the industrial internet of things and the industry 4.0. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3346528>.

10. Saleem, J., Hammoudeh, M., Raza, U., Adebisi, B., & Ande, R. (2018). IoT standardisation. U *ICFNDS'18: International conference on future networks and distributed systems*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3231053.3231103>.

11. Salman, O., Elhajj, I., Chehab, A., & Kayssi, A. (2018). IoT survey: An SDN and fog computing perspective. *Computer Networks*, 143, 221–246. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.07.020>.

12. Roman, R., Zhou, J., & Lopez, J. (2013). On the features and challenges of security and privacy in distributed internet of things. *Computer Networks*, 57(10), 2266–2279. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.12.018>.

References

1. Yang, Y., Wu, L., Yin, G., Li, L., & Zhao, H. (2017). A Survey on Security and Privacy Issues in Internet-of-Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(5), 1250–1258. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2694844>.

2. Assiri, A., & Almagwashi, H. (2018). IoT security and privacy issues. U *1st international conference on computer applications & information security (ICCAIS)* (s. 1–5). <https://doi.org/10.1109/CAIS.2018.8442002>.

3. Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2015). Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*, 76, 146–164. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.11.008>.

4. Atlam, H. F., & Wills, G. B. (2019). IoT security, privacy, safety and ethics. U *Internet of things* (s. 123–149). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18732-3_8.

5. Oracevic, A., Dilek, S., & Ozdemir, S. (2017). Security in Internet of things: A survey. U *2017 international symposium on networks, computers and communications (ISNCC)* (s. 1–6). <https://doi.org/10.1109/ISNCC.2017.8072001>.

6. Nurse, J. R. C., Creese, S., & De Roure, D. (2017). Security risk assessment in internet of things systems. *IT Professional*, 19(5), 20–26. <https://doi.org/10.1109/mitp.2017.3680959>.

7. DiMase, D., Collier, Z. A., Heffner, K., & Linkov, I. (2015). Systems engineering framework for cyber physical security and resilience. *Environment Systems and Decisions*, 35(2), 291–300. <https://doi.org/10.1007/s10669-015-9540-y>.

8. Botta, A., de Donato, W., Persico, V., & Pescapé, A. (2016). Integration of cloud computing and internet of things: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 56, 684–700. <https://doi.org/10.1016/j.future.2015.09.021>.

9. Radanliev, P., Roure, D. C. D., Nurse, J., Montalvo, R. M., & Burnap, P. (2019). Supply chain design for the industrial internet of things and the industry 4.0. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3346528>.

10. Saleem, J., Hammoudeh, M., Raza, U., Adebisi, B., & Ande, R. (2018). IoT standardisation. U *ICFNDS'18: International conference on future networks and distributed systems*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3231053.3231103>.

11. Salman, O., Elhajj, I., Chehab, A., & Kayssi, A. (2018). IoT survey: An SDN and fog computing perspective. *Computer Networks*, 143, 221–246. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.07.020>.

12. Roman, R., Zhou, J., & Lopez, J. (2013). On the features and challenges of security and privacy in distributed internet of things. *Computer Networks*, 57(10), 2266–2279. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.12.018>.

Отримано 18.03.2025

Pidlisnyi Yuriy

PhD student, recipient of the Doctor of Philosophy degree in specialty 122
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: ygodlesny@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9783-3898>. ResearcherID: [LSL-1170-2024](https://orcid.org/LSL-1170-2024)

AUDIT OF IOT NETWORKS: ASSESSING VULNERABILITIES AND PROTECTING AGAINST CYBER ATTACKS

This article addresses current challenges in ensuring security within the Internet of Things (IoT) networks, taking into account the modern challenges of the digital transformation era. The key risks associated with the use of IoT devices are outlined: the limitations of built-in security mechanisms, the lack of unified standards, hardware resource constraints, and the complexity of managing heterogeneous environments. Special attention is given to the role of security auditing as a tool for identifying vulnerabilities, assessing risks, and developing strategies to counter cyber threats. Existing auditing approaches, including reactive (retroactive), proactive, and incremental methods, are analyzed in the context of IoT environments. A comparative analysis of IoT system architectures—centralized, decentralized, and hybrid—is provided, highlighting their impact on security. A test model of an IoT network is proposed for practical threat modeling and auditing procedure verification. The article also focuses on modern risk management methodologies, including: ISO/IEC 27005, NIST RMF, OCTAVE, EBIOS, FAIR, COBIT, and CRAMM. The advantages and disadvantages of each are discussed in the context of IoT, emphasizing the suitability of the EBIOS methodology as the most adaptable for complex hybrid systems. The article also stresses the need for the improvement of security policies, adaptation of standards, and the development of auditing procedures that address both technical and organizational aspects of IoT operations. The main goal is to contribute to the creation of a reliable, scalable, and threat-resistant IoT ecosystem.

Keywords: Internet of Things; IoT security; IT systems audit; risk management; IoT architecture; data protection; cyber threats; security standards; network vulnerabilities; attack counteraction; monitoring; cybersecurity; proactive methods.

Fig.: 5. References: 12. Table: 1.

Mykola Zlobin¹, Volodymyr Bazylevych²¹PhD student

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: mykolay.zlobin@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7653-6109>. Scopus Author ID: 59337918100²PhD in Economics, Associate Professor, Head of ESI EIT

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: bazylamar@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8935-446X>. Scopus Author ID: 57214432127

SYSTEMATIC REVIEW OF DEEP AND MACHINE LEARNING FOR FINANCIAL MODELING

Machine learning (ML) and deep learning (DL) have impacted financial analytics, with advanced solutions for classification and regression tasks. This systematic review provides an analysis of state-of-the-art ML/DL applications in finance, with focus on methods, but also challenges. A total of 41 papers were analysed to identify trends, methodologies, and research gaps in this domain. The study begins with an overview of ML/DL in finance, main classification and regression problems, and challenges in financial data modelling. It then explores ML/DL techniques for classification tasks such as credit scoring, fraud detection, and algorithmic trading, evaluating traditional and modern approaches, including transformer-based models for sentiment analysis. Regression-oriented applications are analysed, with focus on stock price prediction, volatility forecasting, and portfolio optimization, with insights into hybrid modelling strategies. Comparative analysis assesses ML/DL models based on performance metrics, interpretability, and trade-offs between accuracy, computational complexity, and generalizability. The paper also identifies challenges, including data quality, ethical concerns, models, and the integration of ML/DL with traditional financial frameworks. Trends such as explainable AI, federated learning, and quantum computing are discussed as future directions. Findings show the increasing role of ML/DL in financial decision-making.

Key words: Deep learning; machine learning; classification problems; regression models; financial analytics.

Table: 2. References: 41.

Urgency of the research. Financial institutions are now dealing with datasets that traditional analytical methods struggle to process effectively. ML and DL models analyse these large volumes of data, but with improved predictive accuracy and more informed decision-making processes. These technologies have found additional applications in different financial domains, including credit scoring, fraud detection, and market forecasting [1; 2]. Practical significance of this paper represents the impact of ML and DL on financial analytics. In credit scoring, DL models have improved assessment of borrowers' creditworthiness by identifying complex patterns in financial behaviours, thereby reducing default rates. In fraud detection, ML algorithms have improved identification of fraudulent activities by analysing transaction patterns and anomalies. In market forecasting, DL techniques have improved accuracy of predicting market trends, that investors have more informed decisions [3]. The urgency of this research is highlighted by the findings in AI technologies and their potential to revolutionize financial services. Trends such as explainable AI, federated learning, and quantum computing are addressing current challenges in financial modelling, including data privacy, model interpretability, and computational limitations. Explainable AI aims to make ML models more transparent, in order to understand the decision-making process in regulated industries like finance. Federated learning enables collaborative model training across decentralized data sources, preserving data privacy, that is concern in financial data management. Quantum computing is used for solving complex optimization problems in finance at high speed, transforming risk assessment and portfolio optimization.

Target setting. The research addresses the challenge of systematically reviewing and synthesizing state-of-the-art ML and DL methods applied to classification and regression problems within the financial sector. Financial institutions are increasingly adopting ML and DL techniques to improve decision-making processes, risk assessment, and predictive analytics. However, the rapid evolution of these technologies presents a challenge to stay informed about the most effective and current methodologies. This research aims to systemize existing knowledge, evaluate the efficacy of different ML and DL models, and identify gaps in the current literature to guide future research directions.

Actual scientific research and issues analysis. Several studies have attempted to address the challenges associated with classification and regression tasks. A literature review analysed the new findings of ML and DL in financial applications, highlighting their effectiveness in different financial tasks [4]. The paper analyzed the use of DL in economics, with insights into frequently used models and their applications. This research offered a review of DL implementations in economic contexts, with both the potential and limitations of these technologies. In business and finance, a review analyzed ML applications, with the focus on techniques used in marketing, stock analysis, and demand forecasting. The paper also addressed limitations related to data quality and model interpretability [5]. Furthermore, a literature review focused on financial time series forecasting with DL, categorizing studies based on their forecasting implementation areas and model choices. This review highlighted the growing interest in DL models for financial forecasting and identified potential research opportunities [6]. Despite these analyses, challenges exist in the application of ML and DL in finance. Issues such as data imbalance, model transparency, and the need for evaluation metrics remains. Addressing these challenges is needed for the practical utility of ML and DL in financial contexts [7].

Uninvestigated parts of general matters defining. Despite findings in applying ML and DL to financial classification and regression tasks, some areas remain underexplored. One of the main challenges is model interpretability. Many ML and DL models operate as “black boxes”, difficult to understand their decision-making processes. This lack of transparency reduces trust and slows adoption in financial institutions, where interpretability is used for regulatory compliance and risk management. Another unresolved issue is data quality. Financial datasets often contain noise, missing values, or imbalanced classes. This can introduce biases in model training. But also access to high-quality, proprietary financial data is frequently restricted. The problem of concept drift is still a major limitation in financial modelling. Market conditions are dynamic, and statistical properties change over time. Models trained on historical data may become outdated, that lead to reduced predictive accuracy.

The research objective. The objective of this research is to conduct a systematic review of state-of-the-art ML and DL methods applied to classification and regression problems in the financial sector. With analysing existing literature, the paper aims to identify current trends, evaluate the effectiveness of models, and uncover gaps in the application within finance. The outcome of this research is a synthesis of existing studies that analyse the strengths and limitations of ML and DL approaches in financial applications. This includes insights into model performance, data requirements, and contextual applicability. The study also aims to provide an assessment of challenges such as data quality, model interpretability. The paper serves as a resource that highlights existing research gaps, thereby guiding future investigations into ML and DL applications in finance.

Overview of ML and DL in finance. At first, financial institutions relied on traditional statistical methods for tasks such as risk assessment and forecasting. However, ML introduced more sophisticated algorithms capable of learning from data, that led to improved accuracy in financial modelling. As an example, decision trees and support vector machines became popular for credit scoring and fraud detection [8; 9]. The progression from traditional ML to DL marked a shift in financial analytics. DL models, specifically neural networks, have the capacity to process amounts of unstructured data, such as text and images, used for complex financial tasks. Applications of DL in finance include sentiment analysis of news articles for stock price prediction and the development of risk assessment models [10-12]. In recent years, the finance has adopted DL techniques, because of the increasing availability of big data and computational power. This trend has led to the development of more accurate predictive models and automated decision-making systems.

ML and DL have been used for addressing classification and regression problems in the financial sector. The main classification problems that have been identified are credit scoring, fraud detection, customer segmentation. ML algorithms, such as logistic regression are used in assessments of credit reliability of loan applicants. The analysis of variables like credit history, income, and employment status, these models predict the likelihood of default and helping financial institutions in making informed decisions. A study compared ML models, including neural networks and logistic regression, to predict the default status of credit card customers. The results indicated that certain models achieved high accuracy in credit risk assessment [13]. The paper [14] presents the analysis of how ML is transforming digital credit scoring, specifically in rural finance. It highlights that despite findings in financial sector, a portion of the global rural population remains underserved by traditional banking systems. According to the paper nearly one-third of the world's adult population lacks access to banking services, forcing them to rely on informal or semi-formal credit sources. The paper emphasizes how ML algorithms, including decision trees, support vector machines (SVMs), and deep learning models, are being used by financial institutions to develop alternative credit scoring models, overcoming the limitations of conventional scoring methods based on historical banking transactions. The paper also analysis the challenges of the integration of ML models with traditional banking systems, specifically regarding data availability, ethical concerns, and regulatory compliance. The paper [15] examines the accuracy trade-off in ML for credit scoring. In 2020, the total outstanding retail credit in the U.S. surpassed \$4,161 billion, showing the economic importance of fair and accurate credit scoring models. The paper highlights that traditional ML models tend to optimize for profit without considering fairness, that lead to disparities in loan approvals in different demographic groups. It provides a review of fairness criteria, including independence, separation, and sufficiency, and assesses their suitability for credit scoring. Using 7 credit scoring datasets, the paper compares improved fairness approaches such as pre-processing, in-processing, and post-processing methods. The findings reveal that fair in-processing techniques have a balance between reducing bias and maintaining profitability. The paper also shows that reducing discrimination in credit scoring models can be achieved with minimal profit loss, approximately 4.91% when reducing fairness violations below a 0.2 separation metric threshold. However, achieving perfect fairness would result in over a 35% drop in profitability that makes it financially unfeasible for lenders.

DL have further improved credit scoring by identifying complex, non-linear relationships in data. An example is the development of a DL model that outperformed standard credit scoring models, even when using the same data. This model provided more accurate predictions aimed at reducing consumer default [16]. The paper [17] presents evaluation of DL in credit scoring, highlighting their advantages over traditional ML models. The paper analyses the comparison of the performance of DL architectures such as deep belief networks (DBNs), convolutional neural networks (CNNs), autoencoders (AEs), and long short-term memory (LSTM) networks. The review presents the DL applications using commonly used credit scoring datasets, including the Australian, German (categorical and numerical), Japanese, and Taiwanese datasets, assessing model accuracy through metrics like area under the receiver operating characteristic curve (AUC). The findings show that DBNs achieve higher accuracy than shallower networks, as an alternative to traditional ML models for credit scoring. Financial institutions are legally required, under regulations like the general data protection regulation and the Basel accord, to explain automated credit decisions to applicants. The paper [18] proposes a new framework that converts tabular credit scoring datasets into images, in order to enable the use of 2D CNNs for classification while ensuring model interpretability. The research applies CNN models on widely used credit datasets (German, Australian, and home equity line of credit datasets) and shows that techniques such as Grad-CAM, LIME, SHAP values, and Saliency Maps can provide insights into DL credit decisions. The paper empirically validates its approach

through performance comparisons, showing that 2D CNN models outperform 1D CNN models while maintaining interpretability. Then, the SHAP values were identified as the most effective explanation method, improving classification accuracy to 99% and 100% in test cases, and show the practical applicability of explainable DL models in financial decision-making. Then, the analysis that should be included in the review of DL applications in credit scoring [19] assesses whether DL architectures, specifically multilayer perceptron (MLP) networks, and DBNs, outperform conventional credit scoring models such as logistic regression, decision trees, random forests, and extreme gradient boosting (XGBoost). Using 10 retail credit scoring datasets, the paper analyses model performance based on 4 metrics: area under the curve (AUC), brier score (BS), partial Gini (PG), and expected maximum profit (EMP). The results show that XGBoost consistently outperforms all other models, achieving the highest ranking across all performance measures. However deep neural networks do not significantly outperform shallower ML models and are considerably more computationally expensive. The research further explores Bayesian statistical testing methods to compare classifiers, showing the advantages of Bayesian over frequentist hypothesis testing in credit scoring research. The paper concludes that DL is not the most suitable approach for credit scoring, and XGBoost should be preferred for optimal classification performance due to its superior accuracy and efficiency

The next section that should be analyzed is that ML and DL models are used to detect fraudulent activities by analyzing patterns and anomalies in transaction data. Techniques such as logistic regression, random forests, and decision trees have been used for evaluation in identifying fraudulent credit card transactions [1-3,8-9]. Among these, the random forest model showed good performance in predicting fraudulent activities [20]. The paper [21] highlights that random forest when combined with an ensemble feature selection technique integrating recursive feature elimination, information gain, and chi-squared (χ^2) methods, improves fraud detection accuracy. The receiver operating characteristic score of 95.83% indicates the model's strong capability to distinguish fraudulent transactions from legitimate ones. Furthermore, the random forest model achieves an accuracy of 99.6%, with an F1-score of 99.6% and precision of 100%, showing that fraudulent transactions are correctly identified with minimal false positives. The research shows that the ability of the random forest to construct several decision trees and aggregate their results improves the model's generalization and resistance to overfitting. The ensemble feature selection approach also reduces training time while maintaining high model performance, making it highly efficient for real-time fraud detection. The paper [22] highlights that credit card fraud detection is a challenge due to the highly imbalanced nature of fraud datasets, where fraudulent transactions constitute a very small percentage of the total data. To address this issue, the study employs the synthetic minority over-sampling technique to balance the dataset. In this way, it improves the ability of the random forest model to detect fraudulent transactions accurately. The proposed model uses entropy as the guiding criterion for decision tree construction. It also provides optimal splits and reduces impurity in data classification. The model is trained on 1.3 million rows of training data and 550,000 rows of test data, representing both legitimate and fraudulent transactions. The research evaluates model performance using accuracy, precision, recall, F1-score, false negative rate, and false positive rate to assess its effectiveness. The results show that the random forest model achieves a high accuracy of 99.9% and reduces the number of undetected fraudulent transactions.

DL can process large data and provide good results in fraud detection. A systematic literature review highlighted the effectiveness of different DL models, such as CNN and LSTM networks, in detecting fraud across domains like credit card transactions and insurance claims [10]. These models have improved accuracy [3,23]. The CNN model is tested in the paper [24] on three benchmark credit card fraud datasets (European, Australian, and German datasets). The evaluation metrics used include the Matthews correlation coefficient, AUC, and cost of failure. The CNN model achieves an AUC of 87.64% on the European dataset and 70.56% on the German dataset, showing that can

distinguish fraudulent transactions from legitimate ones. Furthermore, the CNN-based fraud detection model reduces the cost of failure, achieving a reduction of nearly 30% compared to traditional models. The finding of the paper [24] is that CNN outperforms traditional fraud detection methods, including random forest and SVM, by a margin of 5-10% in AUC scores. The CNN model is also found to be more resilient to imbalanced datasets, a common challenge in fraud detection, where fraudulent transactions account for less than 1% of total transactions. Then, the paper [25] addresses challenges in electricity theft detection including data imbalance, the curse of dimensionality, and the need for accurate classification. The proposed hybrid model integrates CNN for feature extraction and AdaBoost for classification. The model was trained and evaluated on the State Grid Corporation of China dataset, which contains 42,372 observations, including 3,579 fraudulent user records. The dataset was pre-processed using techniques like synthetic minority over-sampling technique to mitigate the data imbalance issue. Experimental results show that the CNN-AdaBoost model achieves a classification accuracy of 96.35%, outperforming traditional machine learning models such as logistic regression (84.05%), decision trees (90.05%), random forest (90.98%), and support vector machines (90.88%). The model also reduces the root mean square error to 0.2880 and achieves an F1-score of 95.60. Compared to standalone CNN and AdaBoost models, the hybrid approach improves fraud detection accuracy. The significant finding is in the paper [26] of graph convolutional networks (GCN) in detecting fraudulent activities and insider threats. The paper shows that traditional fraud detection models primarily rely on individual user properties and overlook structural relationships between users, which limits their accuracy in identifying coordinated fraudulent behaviors. GCN models overcome this limitation by transforming user behaviors and relationships into a graph-based structure, and the model learns both node-level (individual user) and edge-level (inter-user relationship) features. Unlike CNNs, which are effective for structured Euclidean data such as images, GCNs are designed to handle non-Euclidean data, ideal for fraud detection in complex networks. The paper analyses the GCN model using a real insider threat dataset (CMU CERT v4.2), which consists of 1,000 users and their digital activities over 16 months. The dataset includes event logs, such as email communication, logins, file transfers, and web activity, which are converted into graph representations. The research introduces a weighted adjacency matrix function that quantifies not only direct user connections but also behavioral similarities, improving the detection of fraudulent patterns. Experimental results show that GCN achieves a fraud detection accuracy of 94.5%, outperforming CNN (93%), random forest (85%), logistic regression (82%), and support vector machines (84%). Additionally, the recall rate of GCN is 83.3%, compared to an average recall of 70% for traditional models, meaning GCN reduces the number of undetected fraudulent activities.

Financial institutions employ clustering techniques to segment customers based on their behaviors and preferences, this is done in order to get personalized marketing strategies. AI personalization has been shown to build trust in digital finance with services that align with individual customer needs [27,28]. The paper [28] shows how collaborative filtering, content-based filtering, and hybrid recommendation models improve the accuracy of AI financial suggestions. The study evaluates AI in increasing user engagement, financial decision-making, and marketing strategies for financial institutions. Experimental results show that AI personalized payment recommendations increase user engagement by 27% compared to traditional, non-personalized recommendations. Additionally, fintech companies implementing AI personalization experience a 15% rise in customer retention rates and a 20% boost in conversion rates for financial products and services. An innovative approach was shown in the paper [29] where the evaluation of MyFinanceAI was presented. MyFinanceAI is an AI personal finance platform. The paper highlights how AI financial tools improve savings, but also financial literacy, and user engagement. It also addresses the growing complexity of modern financial management. MyFinanceAI system integrates DNNs and reinforcement learning to provide personalized financial recommendations based on real transaction data, spending habits, and financial goals.

A 6-month pilot study involving 1,000 users showed that 85% of users reported reduced financial stress, with a 43% decrease in financial anxiety scale scores. Additionally, monthly savings increased by 22%, translating to an average additional savings of \$317 per user per month. The system's automated bill management feature also resulted in 92% of users avoiding late fees, leading to an average saving of \$185 per user over the study period. The predictive budgeting module uses autoregressive integrated moving average and LSTM models, improving expense forecasting accuracy by 30% compared to traditional regression models. The findings also showed the impact of AI financial literacy tools, which resulted in a 40% increase in users' financial literacy scores over the study period. And the paper [30] highlights that chatbots and virtual assistants are offering customized financial recommendations, and automated support. The findings are that AI financial advisory systems analyze customer spending habits, investment preferences, and financial goals to deliver customized financial advice. Financial institutions that implement this personalization report a 20% increase in customer engagement and a 15% rise in customer retention rates, showing improved user experiences. The paper also highlights that AI chatbots and virtual assistants in finance reduce customer wait times by up to 35% and improve service accessibility. Additionally, AI models use natural language processing to improve financial security and fraud detection. AI chatbots assist in transactions, and fund transfers, leading to an 18% improvement in customer response times and a 25% reduction in operational costs for banks. These findings were analyzed and presented in Table 1.

Table 1 - Comparative analysis of ML and DL models in financial applications

Model	Findings	Metrics and performance	Ref.
Decision Trees & SVM	Early ML models used for credit scoring and fraud detection; improved accuracy over statistical methods.	Improved early-stage ML classification in credit risk and fraud detection.	[8-9]
Neural networks	Improved default prediction in credit scoring; outperformed logistic regression in risk assessment.	Higher predictive power in financial applications compared to traditional ML models.	[13]
Deep Belief Networks (DBN)	Achieved higher accuracy than shallow networks in credit scoring; effective for deep feature extraction.	More accurate in capturing non-linear financial relationships than standard ML models.	[17]
Convolutional neural networks (CNN)	AUC of 87.64% in fraud detection (European dataset); cost of failure reduced by 30%.	Superior fraud detection performance in high-dimensional financial datasets.	[24]
Long short-term memory (LSTM)	Improved expense forecasting accuracy by 30%; improved financial planning using predictive models.	Better forecasting accuracy in financial risk assessment and management.	[29]
Random forest (RF)	99.6% accuracy in fraud detection; 100% precision with ensemble feature selection, robust for real-time detection.	More effective in fraud detection with feature selection; minimized false negatives.	[20-22]
XGBoost	Outperformed all models in credit scoring; highest accuracy and efficiency across datasets.	Best performance in credit scoring; high interpretability and computational efficiency.	[19]
Graph convolutional networks (GCN)	Outperformed CNN in fraud detection (94.5% vs. 93%); improved recall rate by 10% using graph-based fraud analysis.	Better fraud detection than CNN by incorporating user relationship networks.	[26]
AI Personalization	Boosted customer retention by 15%, engagement by 27%, and conversion rates by 20% through AI-driven recommendations.	Higher engagement, retention, and improved financial advisory personalization.	[28-30]
Hybrid CNN-AdaBoost	96.35% accuracy in electricity theft detection; improved fraud classification over standalone models.	Hybrid model achieved better fraud detection accuracy than standalone DL models.	[25]

Regression analysis is often used in financial modeling, with quantitative tools in order to predict financial outcomes. The most common application is in stock price prediction. Accurately

forecasting stock prices is needed in order to plan investment strategies. Regression models, both traditional and advanced, are used to analyze historical price and market indicators [31,32]. This approach presents a linear relationship between a stock's past performance and its future prices. With historical data, linear regression models can provide baseline predictions, though they may oversimplify complex market dynamics. The paper [31] analyses the linear regression in stock price prediction. The model is used to predict stock prices based on historical data, market indicators, macroeconomic factors, and sentiment analysis. In stock market forecasting, linear regression works by identifying trends and making predictions based on a line of best fit, minimizing the difference between actual and predicted values. The paper highlights that linear regression models have been effectively applied in predicting the closing stock prices of major companies. The research by Pahwa and Agarwal [33] showed the application of linear regression in forecasting the Google stock price using 14 years of historical data. The analyses found that linear regression provided high confidence values in trend forecasting, which is suitable for short-term stock price prediction. Another paper [34] further improved linear regression accuracy by incorporating principal component analysis (PCA) to select the most relevant financial indicators. The results showed that PCA linear regression models were more accurate than standalone models and even outperformed SVM in specific structured datasets. Techniques, such as LSTM networks, a type of recurrent neural network, have shown good capabilities in capturing temporal dependencies in stock price data. The paper [32] analyses LSTM to the Vietnamese stock market which achieved a 93% accuracy in predicting stock price trends, underscoring the model's effectiveness in handling sequential financial data. Combining traditional financial theories with machine learning models improves prediction accuracy. An example is integrating the Black-Scholes option pricing model with machine learning techniques to forecast stock prices in frontier markets [35]. The paper [36] presents option pricing with ANNs and the traditional Black-Scholes-Merton (BSM) model. It presents the introduction of a hybrid option pricing model (BS-ANN) and the comparative analysis of option pricing models, including Monte Carlo simulation, Heston, GARCH, Jump diffusion, and Cox-Ingersoll-Ross models. One of the findings is that the BS-ANN model outperforms traditional methods in terms of accuracy and stability. The paper analyzed the daily stock price data of Khodro, an automobile company, over the past year. The results showed that the BS-ANN model achieved the lowest standard deviation among all tested models, indicating higher precision in predicting European call and put option prices. Compared to standard Black-Scholes pricing, the hybrid ANN model reduced pricing errors and presented a more reliable alternative for real option pricing applications. The paper [37] examined the KOSPI200 options market using historical data from January to December 2023. The findings revealed that traditional models like the Black-Scholes and binomial tree model outperformed other methods in terms of accuracy. RMSE analysis demonstrated that Black-Scholes and the binomial tree method had the lowest prediction errors across all timeframes (weekly, monthly, and 50-day maturity). The Monte Carlo and variance reduction methods showed comparable performance, but their computational demands made them less practical for real-time trading. In contrast, ML models, particularly random forest and XGBoost, were less accurate in predicting option prices but excelled in identifying undervalued options. The investment simulation results highlighted that XGBoost and random forest achieved the highest profitability, showing that ML models could be useful for trading strategies focused on mispriced options. Significant results showed that Black-Scholes and the binomial tree had the lowest errors across all timeframes, 0.650 for weekly predictions, 0.641 for monthly, and 0.385 for 50-day maturities. Monte Carlo simulations with variance reduction techniques (AS, CV, IS) had slightly higher RMSE values, ranging between 0.485 and 0.686. ML models (XGBoost, Random Forest, MLP) had significantly higher RMSE values, with XGBoost at 6.307, random forest at 5.097, and MLP at 21.351 in weekly predictions.

It is important to emphasize that effective risk management is needed for financial stability. Regression analysis helps in quantifying and mitigating potential risks, specifically in volatility forecasting [38,39]. Predicting market volatility is important for risk assessment. ML models, including mnemonic DL techniques, have been developed to forecast midterm stock volatility, thereby helping in risk management and investment decisions [39]. Identifying anomalies in financial data is needed for potential risks. ML models can detect deviations from expected patterns, enabling proactive risk mitigation strategies. The paper [40] presents findings on financial anomaly detection, with DL models, gated recurrent units (GRU) with an attention mechanism (CA Module). The paper highlights traditional statistical models, such as distance-based outlier detection and density-based clustering approaches, with high-dimensional financial datasets. While methods like DBSCAN and k-NN have been used for anomaly detection, they suffer from high computational costs and parameter sensitivity when applied to large-scale market data. To overcome these challenges, the research introduces a hybrid GRU-CA model that improves anomaly detection. The GRU model, a variant of RNNs, addresses the vanishing gradient problem associated with traditional long-sequence financial data analysis. The results showed that GRU effectively retains long-term dependencies in financial time series data, making it superior to RNNs for market anomaly detection. The CA module improves the model's ability to filter relevant information by assigning different weights to market features, reducing noise, and increasing accuracy in detecting fraudulent or irregular trading patterns. The empirical evaluation was conducted using S&P 500 index data, where 70% of the dataset was used for training and 30% for testing. The RMSE metric was used to assess model performance. The findings show that the GRU model alone achieved an RMSE of 13.28, 13.27, and 13.29 across different prediction horizons, whereas the GRU-CA hybrid model significantly improved accuracy, reducing RMSE to 9.76, 9.78, and 9.74, demonstrating its superior ability to identify anomalies and estimate financial risks. On the other hand, the paper [41] presents anomaly detection in dynamic and evolving data environments. The research focuses on unsupervised anomaly detection methods and categorizes existing anomaly detection approaches into 3 main model-based categories: statistical-based models, clustering-based models, and nearest-neighbor models. The statistical-based approaches aim to model the normal behavior of a dataset and identify outliers as data points that significantly deviate from this normal distribution. The study highlights the Gaussian Mixture Model (GMM) as a commonly used statistical method, where an anomaly score is assigned based on the probability of data deviation from the estimated distribution. However, an underlying data distribution is required for effective anomaly detection, which limits its adaptability to evolving data streams.

The clustering-based approaches divide data into groups and classify anomalies based on their deviation from established clusters. BIRCH (balanced iterative reducing and clustering using hierarchies) is one of the earliest clustering-based anomaly detection techniques, designed to process large databases efficiently. The study also presents CluStream, which extends BIRCH by incorporating temporal characteristics of clusters for evolving data. Another significant advancement discussed is DenStream, a density-based clustering approach that improves on DBSCAN for detecting arbitrarily shaped clusters while handling noisy data streams. The DStream model further improves these methods by integrating grid-based clustering, significantly reducing computational overhead in anomaly detection. The nearest-neighbour-based techniques evaluate anomalies by measuring the distance between data points and their closest neighbours. k-Nearest Neighbors (k-NN) anomaly detection and Local Outlier Factor (LOF) are identified as highly effective for identifying localized anomalies in high-dimensional data. The study discusses incremental adaptations of these models for streaming data, such as iLOF (Incremental Local Outlier Factor), which updates local outlier scores dynamically as new data points arrive. However, memory and time complexity constraints pose challenges for real-time implementation. The comparative results found was presented in Table 2.

Table 2 – Comparative analysis of ML and DL in option pricing and anomaly detection

Model	Findings	Metrics	Ref.
Linear Regression	Used for predicting stock prices based on historical data; high confidence values in trend forecasting; suitable for short-term predictions.	Applied to Google stock price prediction with 14 years of data; improved forecasting confidence but struggles with nonlinear trends.	[31, 33, 34]
LSTM (Long Short-Term Memory)	Achieved 93% accuracy in predicting Vietnamese stock prices; capable of capturing temporal dependencies for better long-term forecasting.	Outperformed regression models in stock price forecasting; superior handling of sequential financial data.	[32]
Black-Scholes-ANN Hybrid (BS-ANN)	Outperformed traditional Black-Scholes model in option pricing; lowest standard deviation and improved stability in European option pricing.	Achieved the lowest pricing error among all tested models; reduced mispricing risks compared to Monte Carlo and Black-Scholes.	[36]
Monte Carlo Simulation	Comparable performance to Black-Scholes but computationally expensive; variance reduction techniques improve accuracy.	RMSE ranged between 0.485-0.686; high accuracy but impractical for real-time trading.	[37]
XGBoost & Random Forest (RF)	Less accurate in option pricing but superior in detecting mispriced options; highest profitability in trading simulations.	XGBoost RMSE: 6.307; RF RMSE: 5.097; higher profitability but lower predictive accuracy.	[37]
GRU-CA Hybrid (Gated Recurrent Units + Contextual Attention)	Reduced RMSE from 13.28 to 9.74 in S&P 500 anomaly detection; captures long-term dependencies with attention-weighted feature selection.	RMSE reduced from 13.28 to 9.74; significantly better anomaly detection compared to standard RNNs.	[40]
Gaussian Mixture Model (GMM)	Assigns anomaly scores based on deviation from normal distribution; limited adaptability to evolving data streams.	Effective for financial anomaly detection; requires strong prior knowledge of data distribution.	[41]
Clustering-Based Models (BIRCH, DenStream, CluStream)	Improves computational efficiency for large datasets; captures evolving patterns in financial anomalies.	Reduces computational overhead; improves detection of financial anomalies in evolving datasets.	[41]
Nearest-Neighbor Models (k-NN, LOF, iLOF)	Effective in detecting localized anomalies; incremental updates allow adaptation to streaming data but computationally intensive.	Memory-intensive but provides high precision in anomaly detection; used in fraud detection and market monitoring.	[41]

Conclusion. This systematic review analyzed the impact of ML and DL models in financial modeling, with a focus on classification and regression problems. The study explored ML/DL applications in credit scoring, fraud detection, algorithmic trading, stock price prediction, volatility forecasting, and option pricing, highlighting their strengths, limitations, and real applicability. A total of 41 papers were reviewed to assess emerging trends, model performance, and existing research gaps. Findings indicate that ML and DL models have improved financial decision-making by improving predictive accuracy, risk assessment, and trading efficiency. In credit scoring, DL models such as DBN and CNNs showed good performance over traditional ML models like logistic regression and decision trees. However, challenges such as fairness in credit decision-making and regulatory compliance remain concerns for widespread adoption. Fraud detection techniques using random forests, XGBoost, CNN, and hybrid models like CNN-AdaBoost achieved high detection accuracy. In stock price prediction, traditional linear regression models performed well for short-term forecasting but struggled with market complexities. LSTM networks outperformed traditional

methods. In option pricing, hybrid models such as BS-ANN outperformed traditional pricing methods by reducing mispricing errors and improving stability. Monte Carlo simulations provided comparable results but were computationally expensive, limiting their real-time application. Anomaly detection remains an important area in financial risk management. Future research directions should focus on explainable AI methods to improve model transparency, federated learning to improve data privacy in financial applications, and quantum computing to address computational limitations in high-dimensional modelling tasks.

References

1. Elizabeth Kuukua Woode Amoako, Victor Boateng, Ola Ajay, Tobias Kwame Adukpo, & Nicholas Mensah. (2025). Exploring the role of Machine Learning and Deep Learning in Anti-Money Laundering (AML) strategies within U.S. Financial Industry: A systematic review of implementation, effectiveness, and challenges. *Finance & Accounting Research Journal*, 7(1), 22–36. <https://doi.org/10.51594/farj.v7i1.1808>.
2. Rajendran, S., John, A. A., Suhas, B., & Sahana, B. (2023). Role of ML and DL in detecting fraudulent transactions. In *Artificial intelligence for societal issues* (pp. 59–82). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12419-8_4.
3. Mienye, E., Jere, N., Obaido, G., Mienye, I. D., & Aruleba, K. (2024). Deep learning in finance: A survey of applications and techniques. *Ai*, 5(4), 2066–2091. <https://doi.org/10.3390/ai5040101>.
4. Nazareth, N., & Ramana Reddy, Y. Y. (2023). Financial applications of machine learning: A literature review. *Expert Systems With Applications*, 119640. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119640>.
5. Zheng, Y., Xu, Z., & Xiao, A. (2023). Deep learning in economics: A systematic and critical review. *Artificial Intelligence Review*. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10272-8>.
6. Sezer, O. B., Gudelek, M. U., & Ozbayoglu, A. M. (2020). Financial time series forecasting with deep learning: A systematic literature review: 2005–2019. *Applied Soft Computing*, 90, 106181. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106181>.
7. Shi, S., Tse, R., Luo, W., D'Addona, S., & Pau, G. (2022). Machine learning-driven credit risk: A systemic review. *Neural Computing and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07472-2>.
8. Sahin, Y., & Duman, E. (2011, March). Detecting credit card fraud by decision trees and support vector machines. In *Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists* (Vol. 1, pp. 1-6). https://www.iaeng.org/publication/IMECS2011/IMECS2011_pp442-447.pdf.
9. Huang, C.-L., Chen, M.-C., & Wang, C.-J. (2007). Credit scoring with a data mining approach based on support vector machines. *Expert Systems With Applications*, 33(4), 847–856. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2006.07.007>.
10. Peivandizadeh, A., Hatami, S., Nakhjavani, A., Khoshshima, L., Qazani, M. R. C., Haleem, M., & Alizadehsani, R. (2024). Stock market prediction with transductive long short-term memory and social media sentiment analysis. *IEEE Access*, 1. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3399548>.
11. Khalil, F., & Pipa, G. (2021). Is deep-learning and natural language processing transcending the financial forecasting? Investigation through lens of news analytic process. *Computational Economics*. <https://doi.org/10.1007/s10614-021-10145-2>.
12. Liu, C., Arulappan, A., Naha, R., Mahanti, A., Kamruzzaman, J., & Ra, I.-H. (2024). Large language models and sentiment analysis in financial markets: A review, datasets and case study. *IEEE Access*, 1. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3445413>.
13. Hang, V., Sivakulasingham, S., Wang, H., Wong, S. T., Ganatra, M. A., & Luo, J. (2024). Credit risk prediction using machine learning and deep learning: A study on credit card customers. *Risks*, 12(11), 174. <https://doi.org/10.3390/risks12110174>.
14. Kumar, A., Sharma, S., & Mahdavi, M. (2021). Machine learning (ML) technologies for digital credit scoring in rural finance: A literature review. *Risks*, 9(11), 192. <https://doi.org/10.3390/risks9110192>.
15. Kozodoi, N., Jacob, J., & Lessmann, S. (2021). Fairness in credit scoring: Assessment, implementation and profit implications. *European Journal of Operational Research*. 297(3), 1083-1094. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.06.023>.

16. Albanesi, S., & Vamossy, D. F. (2019). *Predicting consumer default: A deep learning approach* (No. w26165). National Bureau of Economic Research.
17. Hayashi, Y. (2022). Emerging trends in deep learning for credit scoring: A review. *Electronics*, 11(19), 3181. <https://doi.org/10.3390/electronics11193181>.
18. Dastile, X., & Celik, T. (2021). Making deep learning-based predictions for credit scoring explainable. *IEEE Access*, 1. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3068854>.
19. Gunnarsson, B. R., Vanden Broucke, S., Baesens, B., Óskarsdóttir, M., & Lemahieu, W. (2021). Deep learning for credit scoring: Do or don't? *European Journal of Operational Research*, 295(1), 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.03.006>.
20. Afriyie, J. K., Tawiah, K., Pels, W. A., Addai-Henne, S., Dwamena, H. A., Owiredun, E. O., Ayeh, S. A., & Eshun, J. (2023). A supervised machine learning algorithm for detecting and predicting fraud in credit card transactions. *Decision Analytics Journal*, 6, 100163. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100163>.
21. Akazue, M. I., Debekeme, I. A., Edje, A. E., Asuai, C., & Osame, U. J. (2023). UNMASKING FRAUDSTERS: Ensemble features selection to enhance random forest fraud detection. *Journal of Computing Theories and Applications*, 1(2), 201–211. <https://doi.org/10.33633/jcta.v1i2.9462>.
22. Mihali, S.-I., & Niță, Ș.-L. (2024). Credit card fraud detection based on random forest model. In *2024 international conference on development and application systems (DAS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/das61944.2024.10541240>.
23. Chen, Y., Zhao, C., Xu, Y., & Nie, C. (2025). Year-over-Year Developments in Financial Fraud Detection via Deep Learning: A Systematic Literature Review. <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2502.00201>.
24. Raghavan, P., & Gayar, N. E. (2019). Fraud Detection using Machine Learning and Deep Learning. In *2019 International conference on computational intelligence and knowledge economy (ICCIKE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/iccike47802.2019.9004231>.
25. Nirmal, S., Patil, P., & Kumar, J. R. R. (2024). CNN-AdaBoost based hybrid model for electricity theft detection in smart grid. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 7, 100452. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100452>.
26. Jiang, J., Chen, J., Gu, T., Choo, K.-K. R., Liu, C., Yu, M., Huang, W., & Mohapatra, P. (2019). Anomaly detection with graph convolutional networks for insider threat and fraud detection. In *MILCOM 2019 - 2019 IEEE military communications conference (MILCOM)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/milcom47813.2019.9020760>.
27. Kanaparthi, V. (2024). AI-based personalization and trust in digital finance. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.15700>.
28. Abba, S. (2022). Ai in Fintech: Personalized Payment Recommendations for Enhanced User Engagement. *Technology (IJRCAIT)*, 5(01), 13-20. <https://surl.li/txxav>.
29. Talasila, S. D. (2024). AI-Driven Personal Finance Management: Revolutionizing Budgeting and Financial Planning. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 11(7), 397-400. <https://surl.li/dqquaj>.
30. Bhuiyan, M. S. (2024). The role of ai-enhanced personalization in customer experiences. *Journal of Computer Science and Technology Studies*, 6(1), 162–169. <https://doi.org/10.32996/jcsts.2024.6.1.17>.
31. Soni, P., Tewari, Y., & Krishnan, D. (2022). Machine learning approaches in stock price prediction: A systematic review. *Journal of Physics: Conference Series*, 2161(1), 012065. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2161/1/012065>.
32. Phuoc, T., Anh, P. T. K., Tam, P. H., & Nguyen, C. V. (2024). Applying machine learning algorithms to predict the stock price trend in the stock market – The case of Vietnam. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1057/s41599-024-02807-x>.
33. Pahwa, K., & Agarwal, N. (2019). Stock market analysis using supervised machine learning. In *2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (comitcon)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/comitcon.2019.8862225>.
34. Misra, M., Yadav, A. P., & Kaur, H. (2018). Stock market prediction using machine learning algorithms: A classification study. In *2018 international conference on recent innovations in electrical, electronics & communication engineering (ICRIEECE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/icrieece44171.2018.9009178>.

35. Chowdhury, R., Mahdy, M. R. C., Alam, T. N., Al Quaderi, G. D., & Arifur Rahman, M. (2020). Predicting the stock price of frontier markets using machine learning and modified Black–Scholes Option pricing model. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 555, 124444. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124444>
36. Shahvaroughi Farahani, M., Babaei, S., & Esfahani, A. (2024). "Black-Scholes-Artificial Neural Network": A novel option pricing model. *International Journal of Financial, Accounting, and Management*, 5(4), 475–509. <https://doi.org/10.35912/ijfam.v5i4.1684>.
37. Kim, S., Kim, J., & Song, J. (2024). Option pricing and profitability: A comprehensive examination of machine learning, Black-Scholes, and Monte Carlo method. *Communications for Statistical Applications and Methods*, 31(5), 585–599. <https://doi.org/10.29220/csam.2024.31.5.585>.
38. Stanković, Z. Z., Rajic, M. N., Božić, Z., Milosavljević, P., Păcurar, A., Borzan, C., Păcurar, R., & Sabău, E. (2024). The volatility dynamics of prices in the european power markets during the COVID-19 pandemic period. *Sustainability*, 16(6), 2426. <https://doi.org/10.3390/su16062426>.
39. Li, X., Li, Y., Liu, X. Y., & Wang, C. D. (2019). Risk management via anomaly circumvent: mnemonic deep learning for midterm stock prediction. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.01112>.
40. Wang, B., Dong, Y., Yao, J., Qin, H., & Wang, J. (2024). Exploring anomaly detection and risk assessment in financial markets using deep neural networks. *International Journal of Innovative Research in Computer Science and Technology*, 12(4), 92–98. <https://doi.org/10.55524/ijircst.2024.12.4.15>.
41. Salehi, M., & Rashidi, L. (2018). A survey on anomaly detection in evolving data. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 20(1), 13–23. <https://doi.org/10.1145/3229329.3229332>.

Отримано 20.03.2025

УДК 004.8:336.76:519.2

Микола Миколайович Злобін¹, Володимир Маркович Базилевич²

¹аспірант

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: mykolay.zlobin@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-7653-6109>. **Scopus Author ID:** 59337918100

²кандидат економічних наук, доцент кафедри Інформаційних та комп'ютерних наук, директор ННІ ЕІТ

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: bazvlamar@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8935-446X>. **Scopus Author ID:** 57214432127

СИСТЕМАТИЧНИЙ ОГЛЯД ГЛИБОКОГО ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ФІНАНСОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Машинне навчання (ML) і глибоке навчання (DL) покращують фінансову аналітику, зокрема кредитний скоринг, виявлення шахрайства, прогнозування цін на акції та ціноутворення опціонів. Традиційні методи не справляються з великими масивами даних і складністю ринків, що робить ML/DL необхідними для підвищення точності та оцінки ризиків. У цьому огляді проаналізовано найсучасніші програми ML/DL, порівняно методології, ефективність та проблеми, такі як інтерпретованість моделей, якість даних та концептуальний дрейф. У цій статті розглядаються застосування ML та DL для класифікації та регресійних задач у фінансовій сфері, оцінюються їхні методології, ефективність та проблеми. Хоча попередні дослідження підкреслили ефективність мереж глибокого переконавання (DBN), згорткових нейронних мереж (CNN) і мереж з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM), невирішеними залишаються питання інтерпретованості моделей, якості даних і адаптивності до фінансових ринків, що розвиваються. Багато моделей ML та DL функціонують як «чорні скриньки», що обмежує їхню прозорість для регульованих фінансових середовищ. Крім того, фінансові дані страждають від незбалансованого розподілу та шуму, що впливає на точність моделей. Проблема концептуального дрейфу також зберігається, оскільки ринкові умови змінюються з часом, що робить статичні моделі менш надійними. Результати показують, що моделі DL перевершують традиційні підходи.

CNN та DBN покращують кредитний скоринг, а випадкові ліси та XGBoost досягають 99,6% точності у виявленні шахрайства. LSTM-мережі досягають 93 % точності у прогнозуванні цін на акції, перевершуючи регресійні моделі. У ціноутворенні опціонів гібриди Black-Scholes-ANN покращують стабільність і точність порівняно з методами Монте-Карло. Моделі GRU-CA покращують виявлення аномалій, зменшуючи RMSE з 13,28 до 9,74, а GCN перевершують CNN, досягаючи 94,5% точності виявлення шахрайства. Залишаються проблеми з пояснюваністю, цілісністю даних і адаптивністю до ринку. Майбутні дослідження мають бути зосереджені на пояснюваному ШІ, федеративному навчанні та гібридних моделях ML-економетрії для підвищення точності, прозорості та реальної застосовності у прийнятті фінансових рішень.

Ключові слова: глибоке навчання; машинне навчання; проблеми класифікації; регресійні моделі; фінансова аналітика.

Таблиця: 2. **Бібл.:** 41.

Andrii Masol

Architect in Digital technologies, University Association 42 (Paris, France)

Software Developer (Kyiv, Ukraine)

E-mail: andrey.masolu@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4695-8366>. ResearcherID: [rid103841](https://orcid.org/0009-0005-4695-8366)

THE STRATEGY FOR DEVELOPING A RECOMMENDATION SYSTEM BASED ON BIG DATA ANALYTICS IN E-COMMERCE

The popularity of modern e-commerce sites has had a big impact on IT technology. As e-commerce companies strive to provide their customers with the best possible experience, many technologies are used to do so. One way to attract loyal customers is to develop recommendations based on analyzing purchases as well as opinions of other users. This paper discusses the strategy for developing a recommendation system based on big data analytics in e-commerce. Relevant technologies and algorithms of e-commerce recommendation systems are analyzed, and the architecture of e-commerce recommendation system is proposed. Examples of successful implementation of recommendation system based on big data analytics for marketplaces are given.

Keywords: e-commerce; big data analytics; design strategy; recommendation system.

Fig.: 5. Tables: 5. References: 10.

Urgency of the research. The popularity of modern e-commerce websites has had a great impact on IT technology. As e-commerce companies strive to provide the best experience to their customers, many technologies are used to do so. One way to attract loyal customers is to develop recommendations based on analysing purchases as well as opinions of other users.

Target setting. Today, e-commerce encompasses almost all spheres of society. It is believed that their volume doubles every two years. They have become an important resource, the role of which is constantly increasing and affecting all areas of technology and business, increasing benefits for organizations and individuals. Therefore, the research objective is defined, characterized by effective approaches to apply the recommendation system based on big data analytics in e-commerce, which is becoming a driving force in innovative business models and products.

Actual scientific research and issues analysis. Currently, the term “big data” is most common in information technology research, while it does not have a universally accepted definition [1]. The analysis of existing diverse interpretations, their constant updating provides an opportunity to fill in the components of this phenomenon but does not always orient with regard to the prospects and directions of its evolution. There are many ways of using big data in the sphere of electronic commerce. All of them have one thing in common. They can be used to improve user experience, increase sales and optimize internal processes in an organization [2]. However, lack of knowledge in this matter can lead e-commerce companies to lose customers and, as a consequence, to lower profits and profitability.

Uninvestigated parts of general matters defining. The UI optimization plays a critical role in understanding customer behaviour as much as big data analytics. The usability of free classifieds platforms can be significantly improved by investigating the application of big data in this environment. The unreliability and incompleteness of information about products and services creates significant obstacles for complex data processing by analytical systems on free classifieds platforms. Interface design solutions directly affect user satisfaction and behavioural patterns when interacting with such platforms.

The use of big data-driven technologies creates a number of obstacles for online commerce. Earning trust from business representatives becomes a key challenge, requiring convincing evidence that big data analytics can improve business performance. In addition, online retailers face difficulties in organizing data collection, shortage of qualified technical staff in the labour market, and the need to develop the right strategy when developing data storage systems.

The research objective. To characterize the strategies for developing recommendation system based on big data analytics in e-commerce, to develop recommendations for e-commerce.

The statement of basic materials. At the heart of personalized e-commerce marketing is a comprehensive recommendation system, which effectiveness is determined by accuracy of the options offered to the user. To create relevant offers for each customer, advanced big data analytics and detailed customer analysis are used.

By studying the history of visits, preferences and consumer behavior patterns, the system forms an individual portrait of each user. Based on this data, the intelligent recommendation mechanism is built, which is a key element of modern online commerce [1].

The purpose of this article is to characterize strategies for developing the recommendation system based on big data analysis in e-commerce, to develop recommendations for e-commerce.

Big data are large amounts of information that companies collect and process every day. They can include sales data, customer behavior, social media statistics, and more.

There are many reasons why big data-driven recommendations and e-commerce fit together so well. In fact, the ability to utilize big data analytics is one of the most important factors in the success of any online business. Big data analytics can clearly show which processes in the company are going well and what can be improved.

Data analytics in online commerce offers many opportunities to optimise business processes. Improving the customer's experience, increasing sales and improving the internal structure of the company - that's what various methods of applying this data have in common.

Choosing optimal development strategies becomes more likely when entrepreneurs rely on data analytics. Decision-making based on specific indicators is a key advantage of recommendations generated by big data processing in e-business. The analysis helps to identify the most effective channels for attracting visitors, determine audience preferences and establish which content elicits the maximum response [2].

Understanding customers becomes better by analyzing their buying preferences. This information can be used to improve marketing campaigns, user experience or product mix.

In addition, the buying process is simplified and supported by all kinds of data.

E-commerce firms that the data collected to identify patterns and target customer buying behavior can reap big rewards.

The sheer amount of data that e-commerce companies work with on a daily basis makes the application of big data essential to making informed and accurate data-driven decisions.

Big data is essential for e-commerce and serves as a rich source of information that drives business growth and enhances business competitiveness [3].

Strategies for developing recommendations based on big data for e-commerce are reflected in Fig. 1.

Practical relevance of this data lies not only in its collection, but also in its effective analysis and application. For e-commerce, big data enables personalized marketing that attracts and retains customers, ultimately increasing sales and profits. They also optimize inventory management by accurately predicting demand, reducing shortages and surplus goods.

Big data is also revolutionizing the approach to supply chain management by streamlining operations, reducing costs, and ensuring on-time deliveries. In addition, they enable improved pricing strategies based on market trends and competitor analysis, balancing profitability and competitiveness. Finally, big data improves risk management and fraud detection by identifying patterns to proactively address potential risks.

In essence, big data is changing all aspects of e-commerce, giving companies tools to succeed in the competitive marketplace [4].

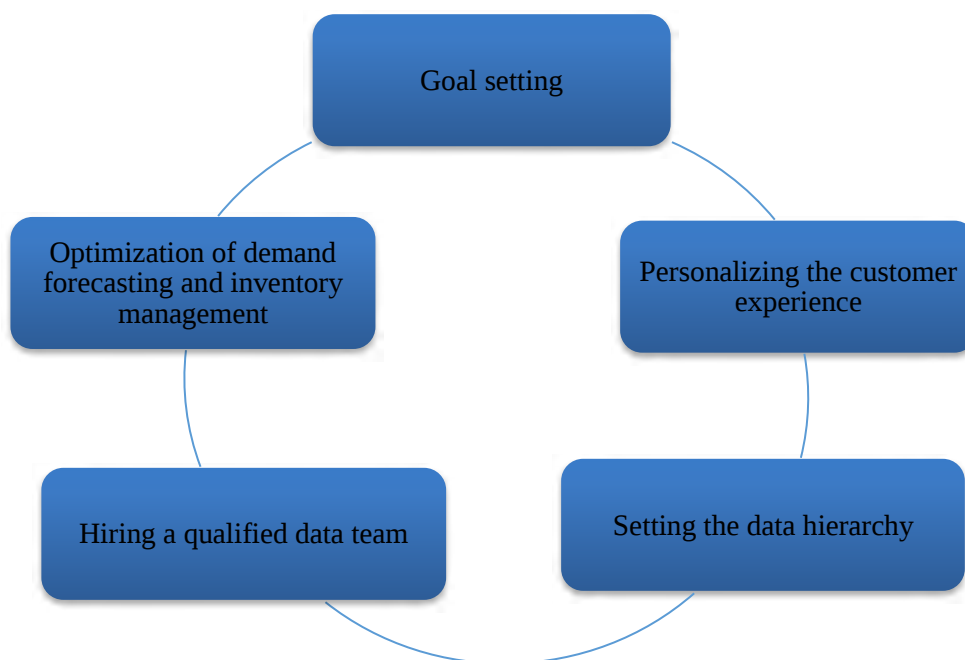


Fig. 1. Strategies for developing recommendations based on big data for e-commerce
Source: developed by the author.

Big data is changing e-commerce logistics and supply chain management by improving planning, scheduling, and delivery processes. Using big data analytics, companies can more accurately forecast demand, optimize delivery routes, and reduce delivery times, significantly reducing operational costs.

Benefits of big data in logistics and supply chain management are summarized in Figure 2.



Fig. 2. Benefits of big data in logistics and supply chain management
Source: developed by the author.

Also, setting right price is crucial for increasing sales, as customers tend to be attracted to lower prices. In e-commerce, this requires analyzing various data sources - a time-consuming but important task to stay competitive.

Today, big data offers a solution by allowing companies to optimize pricing strategies through detailed analysis of data from sources such as price comparison tools, coupon platforms, online catalogs, and competitor websites.

While web scraping tools are widely available, effectively analyzing the data they collect remains a challenge. In the past, retailers relied on manual monitoring and analysis by specialized analysts to track price changes and competitor strategies.

Using big data tools, e-commerce retailers can streamline this process and potentially save significant resources that would otherwise be spent on manual research and analysis [5].

Online commerce is undergoing revolutionary changes thanks to large-scale data analytics. Virtual commerce companies have been able to maintain market leadership through deep insights into consumer trends. Unlike outdated tools like Google Trends, today's technology can predict consumer purchasing decisions with incredible accuracy. Comprehensive analyses of customer preferences enable businesses to adjust their strategic plans in advance. Unprecedented granularity in understanding consumer needs and behavioural patterns is transforming the way e-business is conducted.

Over the years, online retailers have collected enormous amounts of information, including years of data archives. By applying technology to analyse these large-scale information flows, companies can optimise supply chains, reduce warehousing costs and significantly improve the efficiency of all operational processes.

Implementing big data solutions facilitates rapid data-driven decision making. By automating complex analytical tasks and integrating real-time data streams, online retailers can respond quickly to market changes, capitalize on opportunities, and effectively mitigate risk. This proactive approach not only improves operational efficiency but also promotes growth and innovation in the organization [6].

Thus, big data enables e-commerce companies to gain better customer insights, optimize resource allocation, and make strategic decisions. Using data analytics capabilities, companies can successfully operate in a competitive market, improve customer satisfaction and achieve sustainable business growth.

Alibaba effectively utilizes big data to transform e-commerce and microfinance, providing significant assistance to small and micro enterprises. Founded by Jack Ma in 1999, Alibaba, including the Taobao platform, supports millions of small sellers. Key highlights:

1. Alifinance: launched in 2011:

- Uses a data-driven credit rating based on revenue growth and transaction history;
 - offers unsecured, flexible loans managed entirely online;
 - manages a 105 billion yuan loan portfolio with a very low percentage of problem loans.
- Alibaba's big data initiatives are also driving economic growth in rural areas through TaoBao.

2. Village Program: widely used Taobao, which helps the local economy by:

- providing access to wider markets;
- reducing costs for small producers;
- stimulating economic activity and creating jobs in underdeveloped regions.

3. Alipay, Alibaba's online payment platform, demonstrates its big data strategy:

- More than 800 million users processing millions of transactions daily;
- has expanded into mobile payments, especially in less developed regions;
- partnered with Yuebao, a money market fund attracting millions through higher returns and transaction flexibility.

These initiatives demonstrate Alibaba's innovative use of big data to improve financial services and support small business growth.

Amazon's revolutionary approach to inventory management and customer demand forecasting is realised through data science. The company applies sophisticated machine learning models and algorithms to analyse historical sales, behavioural patterns and external factors to accurately anticipate future demand.

The most notable advancement has been personalisation, built on processing colossal amounts of data. Amazon generates customised offers for each user based on comprehensive analysis of browsing history, shopping habits and product ratings, making the user experience unique to each customer.

Through information analytics, the organisation efficiently adjusts stock balances, avoiding both shortages and oversupply of products. During times of high consumer demand - whether it's Prime Day or Black Friday sales - Amazon applies intelligent analytics to predict shopping activity, ensuring there are sufficient quantities of in-demand products at its logistics centres.

The company also uses data science to create an agile supply chain that adapts to changing market conditions. Real-time data analytics helps identify trends, allowing Amazon to effectively adjust inventory levels, distribution routes, and purchasing strategies.

Amazon utilizes a robust security framework, reinforced by data science, to combat fraudulent activity and implement best prevention practices across its vast e-commerce ecosystem. Using machine learning algorithms, Amazon can analyze behavior patterns and identify anomalous activities that may indicate potential fraud [7].

Amazon's systems automatically trigger the investigation when abnormal behaviour is detected, such as irregular purchases or a spike in account login attempts. To strengthen protection against unauthorised access, biometric verification and multi-factor authentication are implemented in the customer interface.

When potentially fraudulent activity is detected, Amazon employs advanced prevention techniques, such as blocking suspicious transactions in real time or temporarily locking accounts until further verification [8].

Marketplace managers face the problem of spending more time updating product information than adding it. This challenge necessitated development of the mechanism that would allow easy export of price list files in the right formats from the existing product range. The second aspect is the regular updating of price and availability information to remain relevant.

It follows that the price list file should be universal, it should contain those fields that distinguish the information systems of all stores. XML standards RSS, Atom and YML are accepted formats. Each price list file can have individual settings that affect the product offerings in it. To manage the content in the PriceList parameters, it is enough to select the desired types and categories of products.

For effective work with tasks of this type, the key principle is as follows: absolute distinction between the display of information and its processing. This allows you to modify and extend individual components of the program independently of each other. In this context, the use of the Data Transfer Object (DTO) design pattern for transferring prepared data between components is appropriate. Implementation begins with the creation of DTO structures. The names of the common file fields are disclosed in Tables 1, 2, 3, 4, 5 (all tables have been developed by the author).

Table 1 - Data fields PriceListData

Field	Data type	Description
CurrencyId	String	ISO currency code
Offers	OfferData	Collection of product offerings
Categories	CategoryData	Collection of product offer categories

Table 2 - Data fields CategoryData

Field	Data type	Description
Id	Int	Category ID
ParentId	Int null	Parental category
Title	String	Category Header

Table 3 - Data fields MeasurementsData

Field	Data type	Description
Weight	Float	Weight
Dimensions	DimensionsData	Dimensions

Table 4 - Data fields DimensionsData

Field	Data type	Description
Length	Int	Length
Width	Int	Width
Height	Int	Height

Table 5 - Data fields OfferParamData

Field	Data type	Description
Name	String	Parameter Name
Value	String	Parameter value

Development of file templates was the next step after filling the PriceListData object with test data without linking to real products.

To implement the concept, it is important that in the developed system each final instance of the price list object has only one public method called export. All necessary logic should be hidden inside the classes.

The class diagram of the described structure is presented in Figure 3:

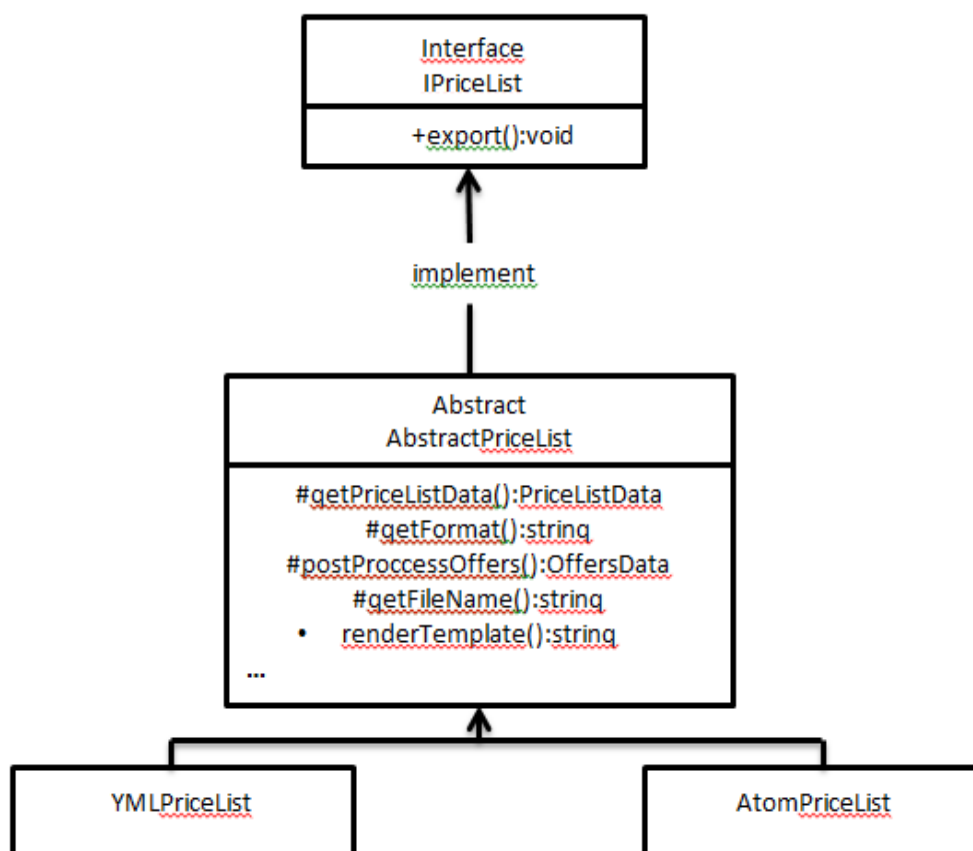


Fig. 3. Class diagram of the data formation structure

Source: developed by the author

To achieve the goal of exporting files, you can simply extract an array of instances of objects implementing the `IPriceList` interface. Then it is worth iterating over this array and calling the export method on each object. The `PriceListsBuilder` class is supposed to be created for these operations. Its constructor provides for obtaining the list of price list objects and then saving the results in a private field. The only public method of this class performs a pass through the list, initiating the process of exporting all price lists contained in it. The class diagram is shown in Figure 4.

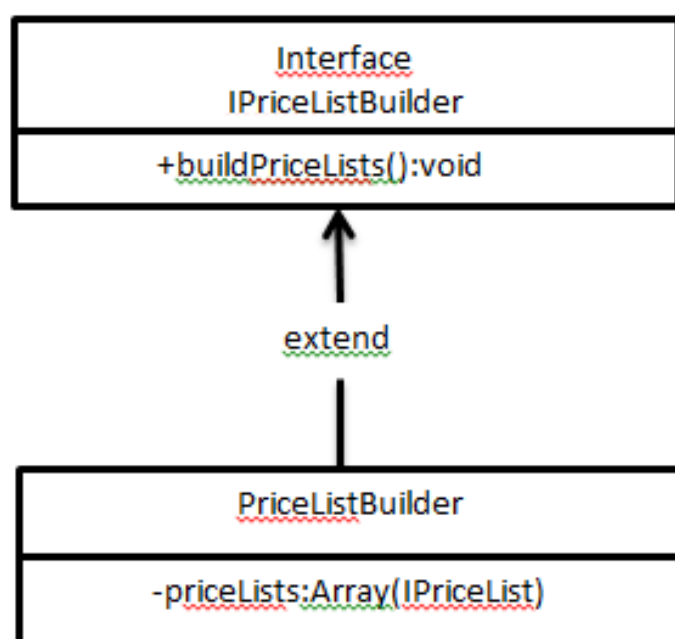


Fig. 4. Class diagram of obtaining the list of PL objects

Source: developed by the author

CRON task allows to rebuild price lists by changing product information at once or at certain time intervals. Unix systems widely use CRON to schedule execution of various tasks at the operating system level. Operations are executed at set times with specified intervals.

Obtaining information about a product before uploading it to the marketplace goes as follows:

1. Information is stored in the warehouse accounting system.
2. It is updated in the CMS.
3. Item data is collected into a common XML file.
4. The link to the XML file is transferred to the marketplace information system.

The improved algorithm of data exchange is presented in Figure 5.

In today's world, e-commerce is rapidly evolving, opening up new horizons for interaction with consumers. Revolutionary changes in online commerce owe much to introduction of advanced Big Data technologies. These innovations make it possible to create fundamentally new approaches to the formation of personalized recommendations for customers.

Intelligent recommendation systems based on the analysis of big data arrays are becoming a key tool for increasing efficiency of e-commerce. They can take into account many factors: from purchase history to users' behavioral patterns in real time. This makes it possible to form accurate forecasts of consumer preferences and offer relevant goods and services.

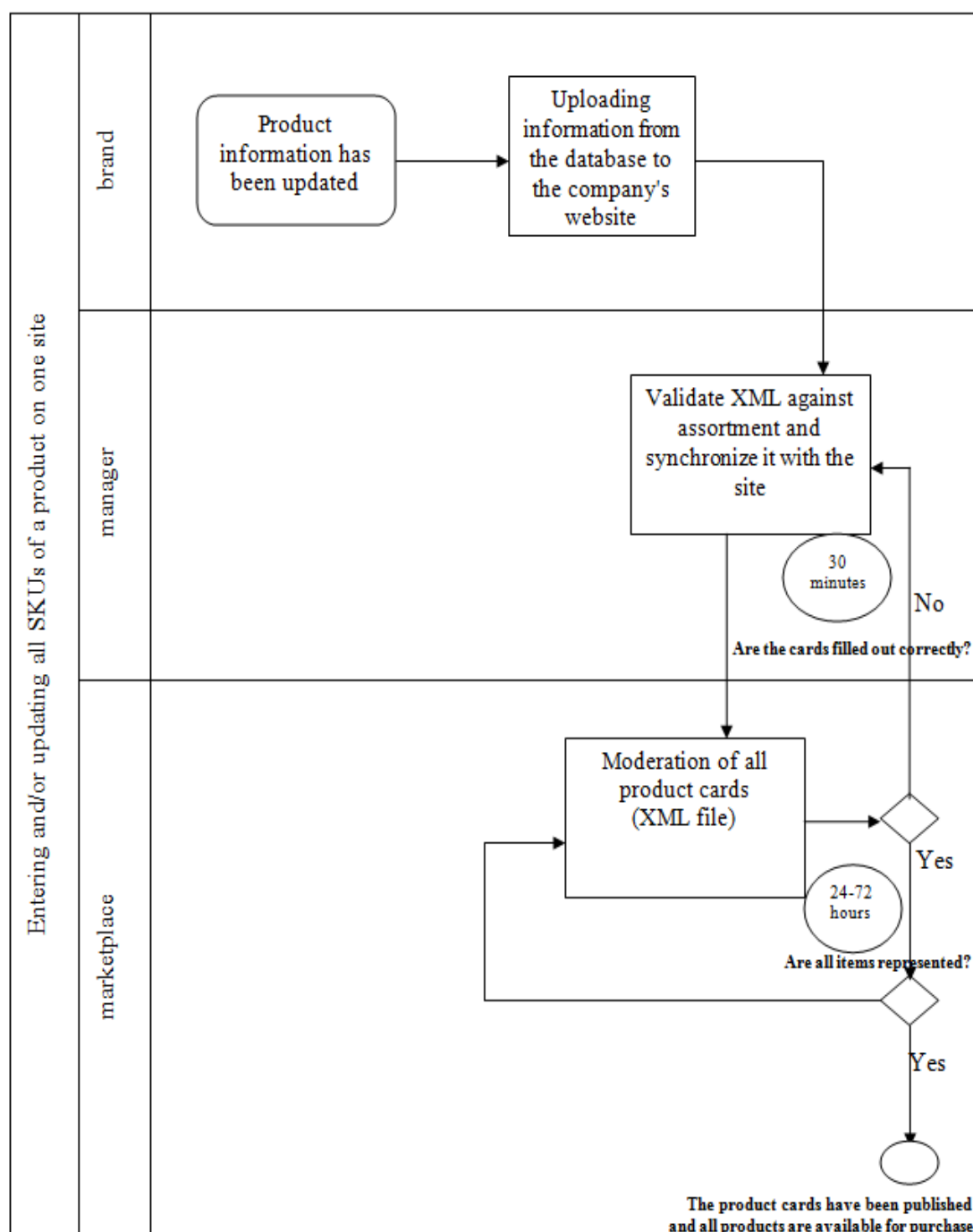


Fig. 5. Improved data exchange algorithm

Source: developed by the author

Development of machine learning technologies opens up new opportunities for improving recommendation systems. Algorithms are becoming more accurate and capable of self-learning, which significantly improves quality of personalization. It is important to note that successful implementation of these systems requires the integrated approach to data collection and processing, as well as compliance with strict rules of personal information protection.

In the future, further integration of recommendation systems with artificial intelligence and predictive analytics technologies is expected, which will make it possible to create even more advanced mechanisms for personalizing the shopping experience. This will not only increase customer satisfaction, but also open new opportunities for e-commerce business growth [9].

Thus, development of recommendation systems based on big data is becoming one of the key drivers of modern e-commerce development, determining the future of retailing in the digital era.

Conclusion. As a result of the study, the set goal was achieved - strategies for developing the recommender system based on big data analytics in e-commerce were characterized, and recommendations for e-commerce were developed.

Big data is impacting all aspects of the highly competitive field of e-commerce. When properly analyzed, this growing sea of information provides online retailers with a wealth of insights, increasing their profits.

An exceptional customer experience is an important advantage for online stores as it increases brand loyalty and reduces customer churn. By analyzing big data, online stores can improve user experience, combine data from multiple platforms to create accurate customer profiles, and personalize product recommendations and content to communicate with customers [10].

Companies can also properly optimize prices, forecast trends, demand, and offer diverse and secure payment methods.

More and more e-commerce companies are using big data analytics to maximize useful information from the endless stream of raw data.

References

1. Roy, D., & Dutta, M. (2022). A systematic review and research perspective on recommender systems. *Journal of Big Data*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-022-00592-5>.
2. Turban, E., Whiteside, J., King, D., & Outland, J. (2017). *Introduction to electronic commerce and social commerce*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50091-1>.
3. Wang, H., & Yu, G. (2016). Personalized recommendation system K-neighbor algorithm optimization. *Y 2015 1st international conference on information technologies in education and learning (ICMII 2015)*. Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/icitel-15.2016.24>.
4. Dinerstein, M., Einav, L., Levin, J., & Sundaresan, N. (2018). Consumer price search and platform design in internet commerce. *American Economic Review*, 108(7), 1820–1859. <https://doi.org/10.1257/aer.20171218>
5. Akter, S., & Wamba, S. F. (2016). Big data analytics in E-commerce: A systematic review and agenda for future research. *Electronic Markets*, 26(2), 173–194. <https://doi.org/10.1007/s12525-016-0219-0>.
6. Ouassini, M. (2022). Development of a recommendation system for e-commerce based on the least squares method. (Unpublished master's thesis). Altınbaş University, Graduate School of Education, Istanbul.
7. Macauley, J. (January 10, 2023) Amazon review data. <https://jmcauley.ucsd.edu/data/amazon>.
8. Santos, B. D. I., Hortaçsu, A., & Wildenbeest, M. R. (2012). Testing models of consumer search using data on web browsing and purchasing behavior. *American Economic Review*, 102(6), 2955–2980. <https://doi.org/10.1257/aer.102.6.2955>.
9. Cherednichenko, O., Vovk, M., Kanishcheva, O., Godlevskiy, M. (2018). Towards Improving the Search Quality on the Trading Platforms. In: Wrycza, S., Maślankowski, J. (eds) *Information Systems: Research, Development, Applications, Education. SIGSAND/PLAIS 2018. Lecture Notes in Business Information Processing*, vol 333. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00060-8_2.
10. A. Almohsen, K., & Al-Jobori, H. (2015). Recommender systems in light of big data. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 5(6), 1553. <https://doi.org/10.11591/ijece.v5i6.pp1553-1563>.

Отримано 16.03.2025

Андрій Володимирович Масол

архітектор з цифрових технологій, Університет Association 42 (Париж, Франція)

Розробник програмного забезпечення (Київ, Україна)

E-mail: andreymasolu@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4695-8366>. ResearcherID: [rid103841](https://orcid.org/0009-0005-4695-8366)**СТРАТЕГІЯ РОЗРОБКИ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ
АНАЛІТИКИ ВЕЛИКИХ ДАНИХ В E-COMMERCE**

Популярність сучасних веб-сайтів електронної комерції сильно вплинула на ІТ-технології. Оскільки компанії електронної комерції прагнуть забезпечити найкращий досвід для своїх клієнтів, вони використовують для цього багато технологій. Один із способів залучити лояльних клієнтів – це розробка рекомендацій на основі аналізу покупок, а також думок інших користувачів.

Сьогодні електронна комерція охоплює практично всі сфери життя суспільства. Вважається, що кожні два роки їх обсяг подвоюється. Вони стали важливим ресурсом, роль якого постійно зростає і впливає на всі сфери технологій і бізнесу, збільшуючи вигоди для організацій і окремих людей. Таким чином, визначено мету дослідження, яка характеризується ефективними підходами до застосування системи рекомендацій на основі аналізу великих даних в електронній комерції, яка стає рушійною силою у сфері інноваційних бізнес-моделей і продуктів.

Наразі термін «великі дані» є найбільш поширеним у дослідженнях інформаційних технологій, але не має загальноприйнятого визначення [1]. Аналіз існуючих різноманітних трактувань, їх постійне оновлення дає можливість наповнити складові цього феномену, але не завжди зорієнтує щодо перспектив і напрямів його еволюції. Існує багато способів використання великих даних у сфері електронної комерції. Усіх їх об'єднує одне. Їх можна використовувати для покращення взаємодії з користувачем, збільшення продажів та оптимізації внутрішніх процесів в організації [2]. Однак відсутність знань у цьому питанні може призвести до того, що компанії електронної комерції втраять клієнтів і, як наслідок, до зниження прибутку та прибутковості.

Оптимізація інтерфейсу користувача відіграє вирішальну роль у розумінні поведінки клієнтів так само, як і аналіз великих даних. Зручність використання платформ безкоштовних оголошень можна значно покращити, дослідивши застосування великих даних у цьому середовищі. Недостовірність і неповнота інформації про товари та послуги створює значні перешкоди для комплексної обробки даних аналітичними системами на платформах безкоштовних оголошень. Дизайнерські рішення інтерфейсу безпосередньо впливають на задоволеність користувачів і моделі поведінки під час взаємодії з такими платформами.

Використання технологій, що керуються великими даними, створює низку перешкод для онлайн-комерції. Завоювання довіри представників бізнесу стає ключовим завданням, яке вимагає переконливих доказів того, що аналітика великих даних може покращити ефективність бізнесу. Крім того, онлайн-рітейлери стикаються з труднощами в організації збору даних, дефіцитом кваліфікованого технічного персоналу на ринку праці та необхідністю розробки правильної стратегії при розробці систем зберігання даних.

В результаті досягнуто мети - охарактеризовано стратегію розробки системи рекомендацій на основі аналітики великих даних в електронній комерції, розробити рекомендації для електронної комерції.

Ключові слова: електронна комерція, аналіз великих даних, стратегія розвитку, система рекомендацій.

Рис.: 5. Табл.: 5. Бібл.: 10.

Bohdan Velihorskyi¹, Vladyslav Baida², Maksym Khomenko³

¹Third-category specialist of STP “Development of a scientific and innovative ecosystem as the basis for sustainable transformation of the university”

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: bogdan_vel@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4492-4156>

²PhD student of the Department of Information and Computer Systems

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: Vladyslav.Baida@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2172-8057>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ>

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radiotechnic and Embedded Systems

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: mr.homax@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9084-3527>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=3K50Dg8AAAAJ>

**PRACTICAL ASPECTS FOR CREATING USER INTERFACE
OF REMOTE ELECTRONICS LABORATORY**

The common issues of remote laboratories are highlighted, including user interface and security procedures. Approach of dividing user interface onto two parts (Security subsystem and Experiment subsystem) is proposed. Single-page web application as an optimal form of accessing remote laboratories is defined and justified. Software tools for the implementation of front-end part of remote laboratory are presented. The general view, features and components of the user interface of implemented remote power electronics laboratory are demonstrated.

Keywords: remote laboratory; user interface; power electronics; web application; Vue.js framework; front-end.

Fig.: 8. References: 14.

Relevance of the research. The educational process becomes more advanced as the years go by. Thanks to discoveries in various fields, the information brought to students and pupils is filtered through experience so that they can learn actual facts about the world around us. However, the ways in which students can acquire knowledge are also expanding. This is mainly due to the constant development of information technologies (IT) [1].

The development of the IT sphere allows us to use the Internet and various computing devices (computers, laptops, smart TVs, smart phones, etc.) for fast and convenient learning for the average user. You only need to know where and how all necessary materials can be found or accessed with a few clicks or touches of your finger. Thanks to this, any work of art or interesting article can be consumed without leaving home. In addition, the increasing speed of the Internet connection allows us to receive large amounts of data faster, and you can enjoy broadcasts of football matches or livestreams of your favourite YouTube channel in real time. The same can be said about the educational process for pupils and students.

Since its beginnings in ancient times, the educational process has usually been seen as a series of classes where students and pupils attend institutions and meet teachers who share knowledge with young minds. In the absence of modern technologies such as the Internet, other classical ways of acquiring knowledge were impossible, which was crucial in difficult times (during wars, pandemics, etc.), when one could not physically attend classes. The invention of the Internet and the results of IT development are prerequisites for the process of remote learning, where students and teachers contact each other via the global network.

The COVID-19 global pandemic in 2020 proved to us that difficult times, when it is risky to physically attend classes, can happen anytime, anywhere. Since then, remote learning has become a common practice all over the world. It is important to note that in Ukraine today the issues of remote learning are quite important due to the continuing full-scale Russian invasion of Ukraine, which makes the classroom process impossible in some of the regions. Remote learning can be helpful in these cases as it allows professors to teach a large number of geographically dispersed students [2].

Problem statement. One of the most important issues is the quality of remote practical learning. Unlike the theory, the practical part requires interaction with real equipment and devices (mechanisms, wires, etc.), which cannot be done through online meetings in any of the existing software solutions. Students can gain theoretical knowledge in the classroom, but the necessary practical knowledge and experience can only be gained in the laboratory [3]. This is where simulation tools and remote laboratories come into play.

Simulation tools are software that demonstrates how a system or device works using program code and mathematical equations. For example, when a user wants to interact with the Arduino board, the student opens the appropriate simulation tool, which creates this virtual board for the experiments. It is important to note that this virtual board is not physically accessible and exists only as a sequence of logical 0's and 1's.

Like simulation tools, remote laboratories can be used for conducting experiments and investigating physical or electrical phenomena too. However, the hardware that a user interacts with remotely is physically installed somewhere (e.g. in a scientific institute, university or school). Furthermore, these hardware components can be accessed both remotely and physically. Working with a remote board or microcontroller requires a stable and reliable Internet connection, which can be a major problem for those students who live in places with poor Internet coverage.

Remote laboratories have another disadvantage compared to simulation tools, known as limited capacity [4]. This means that each laboratory has a fixed number of users who can access the equipment at the same time. In popular courses where the number of students is very high, this problem should be solved to avoid long queues.

Obviously, there are, many challenges faced by those implementing remote laboratories for accessible distance learning: laboratory capacity, funding, security issues, etc. In this article, issues of user interface design are highlighted and solutions for remote laboratory systems were presented based on a power electronics remote laboratory implemented at Chernihiv Polytechnic National University.

The results of the research on user interfaces of remote laboratories will make the process of remote practical education more flexible and convenient for students.

Analysis of recent research and publications. Having analyzed articles related to remote laboratories, we can say that a significant part of them generally describe how remote laboratories are built, i.e., their structure. The number of materials is high, which indicates increased interest in the implementation of such laboratories in educational institutions. Some articles highlight the importance of remote laboratories for simplifying the educational process, while another part gives detailed information about possible problems during development. Additionally, some articles provide detailed descriptions of existing types of remote laboratories, which can be very helpful for those who have only started researching this topic.

Xuemin Chen Gangbing Song and Yongpeng Zhang in the article “Virtual and Remote Laboratory Development: A Review” analyzed some of the remote virtual and remote laboratory development tools (Java, Flash, VPN, XML, LabVIEW, Simulink, Matlab, Web 2.0) [5]. The authors also divide the process of remote laboratory development into four parts: computer hardware and software, data digitization and collection, data transmission and visualization, and network. In the end of the paper, it is summed up that Web 2.0 is much more advanced compared to Web 1.0 in terms of providing remote laboratory applications to other users.

Julien Broisin, Remi Venant and Philippe Vidal in their work “Lab4CE: a Remote Laboratory for Computer Education” introduce the Lab4CE (Lab for Computer Education) environment, which can be useful for those, who learn aspects of work with computer (for instance,

Linux commands, file system organization etc.) [6]. Furthermore, results of the research and statistics are presented, which are important for improving the usability and are a kind of feedback from real students. Additionally, this article answers the question of how virtualization tools can be used in remote laboratories.

Some research findings propose unusual solutions for remote laboratories. A good example of that is “Augmented Reality for the Improvement of Remote Laboratories: An Augmented Remote Laboratory”, authored by Jose Manuel Andújar, Andrés Mejías, and Marco Antonio Márquez. The main idea of the paper is that augmented reality is the intermediary between a user and a remote laboratory, and can be a good solution of implementing user interface because it brings more realism [7]. However, it requires more steps in creation of remote laboratory and experience in the field of augmented reality. As an illustration of capabilities of this proposal, the design of a digital control system based on an FPGA development board is presented.

The problems of remote laboratory design are described in detail in the article “Design and Implementation issues for Modern Remote Laboratories” (Eliane G. Guimaraes, Eleri Cardozo, Daniel H. Moraes and Paulo R. Coelho). The main topics are access control, security and the integration of QoS (Quality of Service) [8]. At the end of one paper, the authors conclude that programming languages such as Java, Python and Matlab seem more appropriate for coding experiments in the engineering domain of a system. Furthermore, it is stated that the most suitable architecture is one containing microserver and is AJAX-based. Lastly, authors highlight importance of using federated operations, which allows experiment and resource sharing. The common mechanism for achieving this is single sign-on authentication with federated authorization.

Based on the review above, we can summarise the following:

- The interest in implementation of remote laboratories in educational institutions grows over the years, which is caused by modern world challenges and availability of remote communication technologies.
- In most cases, user interface of remote laboratories consists of buttons, sliders, charts and other graphic elements, that can be interacted with by a click on mouse button or tapped by a finger. Although this is the commonly used approach, other more advanced user interface elements such as augmented reality are also possible.
- The important points in remote laboratories implementation are security and access control, so that corresponding web application should contain authentication and authorization procedures.
- Feedback from students and statistical information about remote laboratory use can be helpful for improvement of these systems and eliminating drawbacks that worsen user experience.

Isolation of previously unexplored parts of the general problem. Most articles describe technical details of web applications for remote laboratories and do not contain much information on user interface elements, especially in the power electronics domain. There are no articles that provide a comprehensive description and justification of the chosen input/output elements and recommendations for their proper use. Furthermore, user interface design in the context of remote laboratory implementation involves various issues that need to be discovered and resolved.

The research objective is to become familiar with the analysis of potential problems that may arise during the implementation of user interfaces for remote laboratories, and to highlight some practical aspects that may simplify this task, with a focus on remote power electronics laboratories. Moreover, the importance of user experience for user interface design needs to be determined, along with typical elements of web application screens for performing remote experiments in the field of power electronics. These results will help to make the process of user interface implementation easier and more effective.

Presentation of the main material. User interface (UI) is the point of human-machine (computer) interaction and communication with a device. UI includes display screen, appearance of a desktop or web application, menu in Android devices, keyboard, touchpad, touchscreen, mouse, slider and many other elements that can be viewed by eye and at the same time interacted with.

A properly designed user interface encourages an easy, natural, and engaging interaction between a user and a system, and it allows users to carry out their tasks. With a good user interface, the user can forget that he or she is using a computer and get on with what he or she wants to do [9]. However, it is important to note that judging whether a user interface is good or bad can be different and subjective, as each user has their own user experience.

Another important aspect of user interface design is known as user experience. When designing a system, it is better to provide a good and convenient way of interaction that is understandable and clear for most of the potential target audience, so that consumers will give you good feedback on your product. It simply means that user experience recommendations and common practices for user interface implementation should be appreciated.

The Power Electronics remote laboratory, implemented at Chernihiv Polytechnic National University (within the NGI Search project, grant agreement No 101069364), consists of 5 main components: student's computer, router, server, Boost experiment and Buck experiment (see Fig. 1).

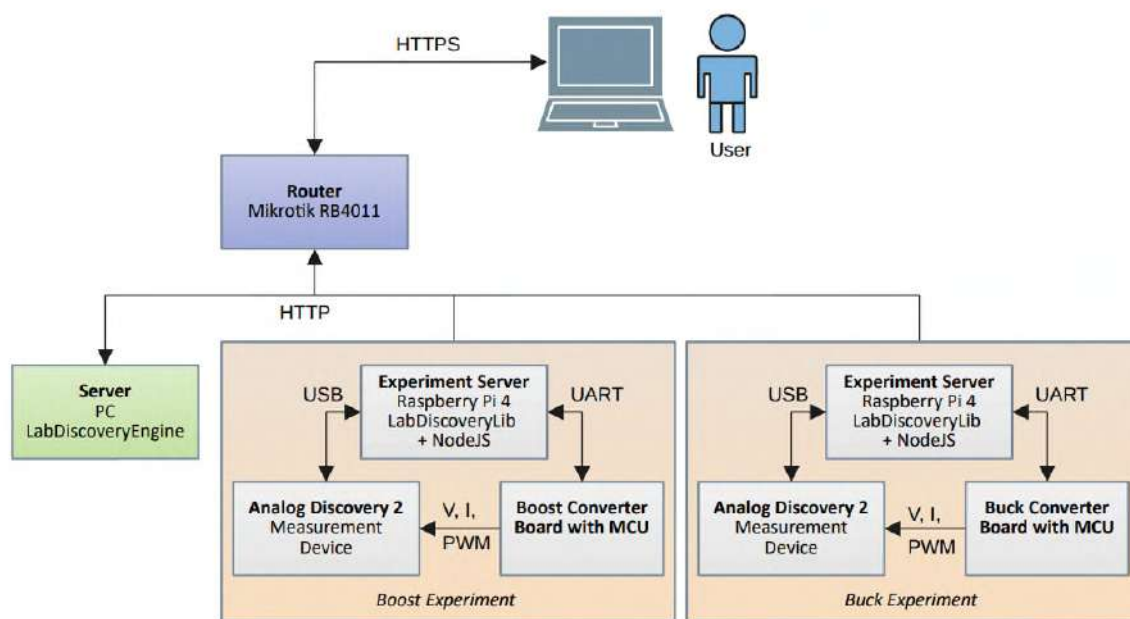


Fig. 1. Power Electronics Remote Laboratory Architecture

Source: developed by the authors.

As it can be seen on the figure above, a user (actually an electronics student) can only access the system via the web application on the local computer. In other words, the access is possible only from the front-end part of the remote laboratory, while all the hardware and back-end server part is hidden from the user.

Router is a network device that transmits requests from the user to the server and retrieves responses containing measurement data and operations to be performed with real hardware.

Server is a desktop computer installed in the real laboratory along with a router and hardware for power electronics experiments. The purpose of this computer is to quickly maintain and monitor the work of the remote laboratory. These tasks can be handed over to the system administrators or to the developers of the server part. Furthermore, this server is responsible for access control and security measures, which is achieved by embedding the LabDiscoveryEngine subsystem.

The Boost and Buck Experiment includes an Experiment Server that performs measurements on demand (actually, in response to the user's request). The Analog Discovery 2 multi-function device allows to retrieve real-time values of Voltage (V), Current (I) and PWM from the Board with MCU. The only difference between the Boost experiment and the Buck experiment is the converter topology and some circuitry.

Talking about the user interface, 2 parts should be highlighted. The first one is for authentication and authorization tasks (Security subsystem), which is mandatory because access to the remote laboratory must be restricted to those who are not students of the educational institution. The second one (Experiment subsystem) is for the web application, where the user interacts with buttons and sliders. This is the first practical aspect of user interface implementation in remote laboratories, which divides the system into the Security subsystem and Experiment subsystem.

Security subsystem based on the LabDiscoveryEngine. Web application containing the experiment can only be accessed if the user has been granted special access to the system.

For the implementing of Security subsystem, it is easier and less time-consuming to integrate solutions that have already been developed, where possible. A good example of such solutions is LabDiscoveryEngine – an open-source remote lab management system that allows institutions to publish, share, discover and access their physical educational laboratories, thus democratizing and increasing access to equipment and resources regardless of space and time and saving costs [10].

Key features of LabDiscoveryEngine subsystem include:

- open source, so that communities can improve this project if they want;
- facilitating the remote creation and maintenance of remote laboratories in various fields of study;
- providing authentication and authorization mechanisms for remote laboratories;
- integration with the LabsLand portal.

When a student wants to access the laboratory, they should use the login and password provided by the course supervisor or lecturer (see Fig. 2).



Fig. 2. Log in window to the remote laboratories' environment [10]

If a user successfully enters confidential information, a unique session identifier is issued, allowing any available remote laboratory to be used (see Fig. 3).

All laboratories

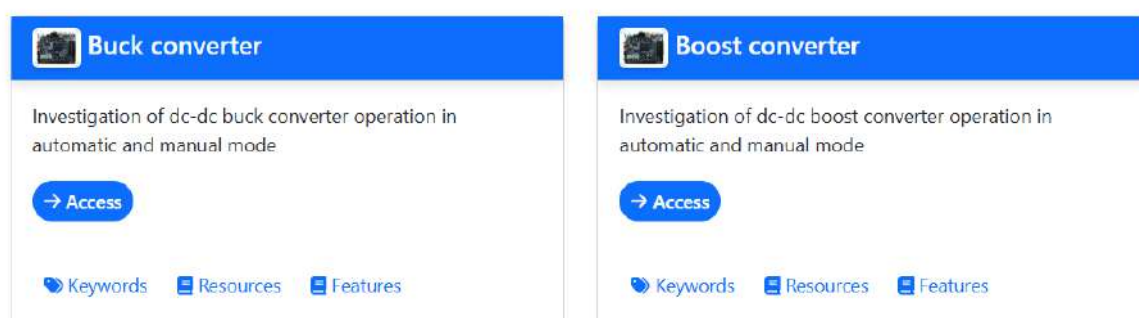


Fig. 3. Available remote laboratories screen [10]

To open a remote laboratory web application, a student must click on the "Access" button. After that, if the lab is not in use at that moment, then the user will be redirected to another page with the Experiment subsystem, otherwise a corresponding message will be displayed that the laboratory is busy. This is another task for the LabDiscoveryEngine to determine whether a laboratory is in use or not.

As a conclusion to this section, we can say that providing security and easy limited access to remote laboratories is easy to implement thanks to available open source solutions such as LabDiscoveryEngine. This is another practical aspect related to the implementing the user interface of remote laboratories.

Experiment subsystem. The Experiment subsystem allows students to perform experiments with DC-DC Buck and Boost Converters. However, only one laboratory is accessible per web-page. It means that after entering, for example, DC-DC Buck Converter from LabDiscoveryEngine, to load DC-DC Boost Converter laboratory you need to back and select another laboratory. This approach can be helpful because students can use different remote laboratories concurrently (i.e., one student works with Boost Experiment, second one performs the Buck experiment at the same time), so that the queue of students ideally becomes twice small.

General view of the Experiment subsystem of power electronics remote laboratory, developed in the project, is presented in Fig. 4.

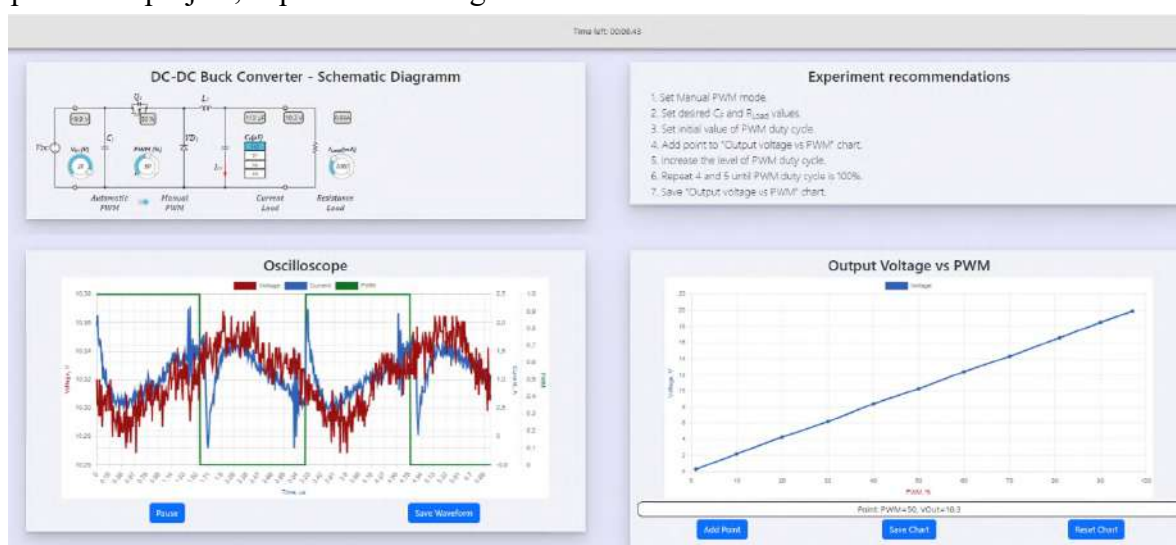


Fig. 4. General view of Experiment subsystem

Source: developed by the authors.

The experiment subsystem window has been designed to provide access from one page to all parts of the experiment, including the measured data and signals, control elements, recommendations, etc. Finally, it was designed consisting of 4 panels:

- Schematic diagram (DC-DC Buck Converter or DC-DC Boost Converter);
- Experiment recommendations;
- Oscilloscope;
- Output Voltage vs PWM.

As previously stated, queuing and scheduling of access is a key issue in remote laboratory development. To enhance user experience and minimise the time spent waiting for experiment equipment to become available, a countdown timer has been incorporated into the interface at the top of the window. This timer provides an additional solution to the problem of long queues by ensuring a balanced allocation of time for the experiment. Based on assessments (academic staff of the university, lecturers of “Power electronics” course in CPNU), the optimal time for executing all experiments has been determined to be 10 minutes, which is sufficient for completing all tasks without causing long student queues.

In terms of implementing user interfaces in remote laboratories, it is recommended that single-page front-end frameworks such as React, Angular, Vue.js or any other relevant ones are utilised. By consolidating all elements of the user interface on a single page of the web application, students are able to perform experiments more efficiently, as they do not need to refresh, navigate to the next or previous page, which can be time-consuming. However, if the number of elements is very high, the user may need to scroll down the page constantly, which can be inconvenient. In such cases, it would be beneficial to enable/disable components dynamically to enhance the user experience.

Following a thorough comparison of the available options, Vue.js was selected for use in the project. This framework is characterised by its approachability, performance and versatility in building user interfaces [11]. It utilises an MVVM pattern (model-view-viewmodel), which facilitates the development of programming code and the testing of individual modules. Additional features of Vue.js include a component-based structure, reactivity, more advanced transitions and routing. Furthermore, the Bootstrap framework allows panes of the remote laboratory to be placed as a table with dynamic size change when the screen becomes smaller [12].

Following the completion of the general user interface for the power electronics remote laboratory, features of individual components of the Experiment subsystem, with a focus on enhancing the user experience, should be discussed.

Figure 5 demonstrates the user interface of the *Schematic Diagram* for DC-DC Buck Converter.

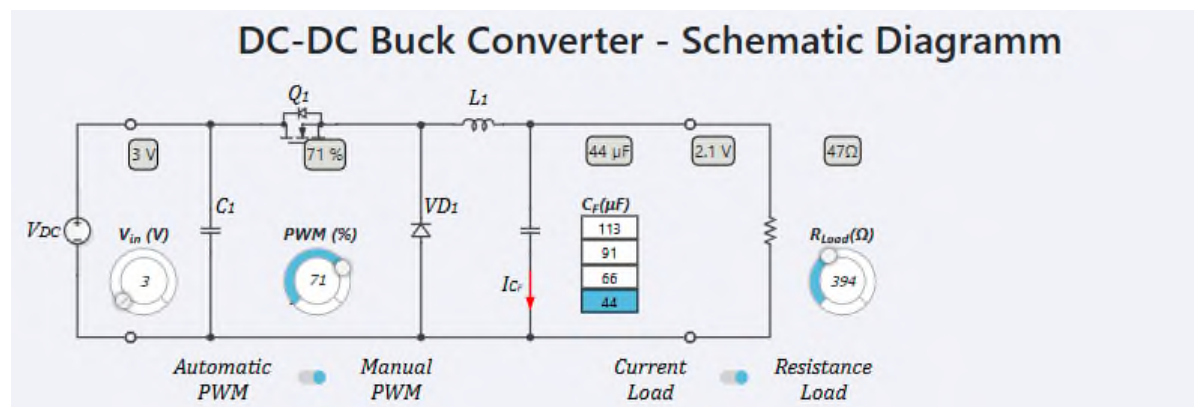


Fig. 5. View of Schematic Diagram with control elements and sensor indicators
Source: developed by the authors.

It should be noted that the Schematic Diagram pane fulfils two functions: firstly, it provides a visual representation of the circuit under investigation by the student in the experiment; secondly, it incorporates control elements and sensor indicators into the schematic diagram, where they interact with the elements of the circuits. From a didactic perspective, this feature is advantageous as it enables students to associate interface elements with their role in circuitry. For instance, the input voltage slider, located on the left side of the image of the input voltage source, serves as an interactive component. Additionally, the schematic diagram is presented in a manner consistent with the format found in educational materials such as books or lecture notes, further enhancing the student's learning experience. From a technical perspective, the web application utilised an SVG file of the electric circuit due to the vector format's ability to maintain quality when scaled. This file format is particularly well-suited for web applications operating on devices with varying screen resolutions. On top of the transparent image, real value indicators and control elements are positioned. To ensure the correct placement of all these elements within the gaps of the electric circuit, additional CSS styling was incorporated, involving manipulations with relative and absolute positions. The implementation of a grey background for the real-value indicators serves to prevent students from erroneously using them as input elements.

In order to optimise the user experience, the input element type should be compatible with the type of value, list or range, etc. For instance, in our case, in the remote laboratory, one filter capacitor value out of four available should be selected. As a solution, the 4-mode switch was used, which also perfectly fits the screen. However, it is important to note that the input voltage should be varied within the range of 3 to 21 V. To facilitate precise value entry, a round slider storing 18 possible values is recommended. Students can enter a more precise value by clicking in the centre of the slider [13].

Vue.js reactivity allows to dynamically control the visibility of elements, enhancing the user experience in remote laboratories. For instance, when the mode selector is set to "Manual PWM", a dedicated round slider becomes accessible for entering PWM mode. In the other position of the selector, the slider is concealed.

The "Experiment recommendations" pane looks clear. It is only a set of steps which the student needs to reproduce to complete the task (see Fig. 6).

Experiment recommendations

1. Set Manual PWM mode.
2. Set desired C_F and R_{Load} values.
3. Set initial value of PWM duty cycle.
4. Add point to "Output voltage vs PWM" chart.
5. Increase the level of PWM duty cycle.
6. Repeat 4 and 5 until PWM duty cycle is 100%.
7. Save "Output voltage vs PWM" chart.

Fig. 6. View of Experiment recommendations

Source: developed by the authors.

The next part of the remote laboratory interface, pane "Oscilloscope", shows oscillograms (visualizations of signals over time) of voltage, current and PWM values (Fig. 7). For the visualisation of datasets as a chart, the previously implemented library was used [14]. Two buttons below the chart are used for controlling the oscillograms. The first button, labelled 'Start/Pause', enables the user to control the oscillograms by selecting whether values are to be read from the oscilloscope or not. The second button, 'Save Waveform', allows students to capture a screenshot of the chart and save it on their computer.

This small button enhances the user experience by eliminating the need for manual screenshot capture and component trimming in laboratory work reports. It is also important to note that the oscilloscope is fully automated, eliminating the need for manual control adjustments (time/div, V/div and A/div) for the simplicity and better user experience.

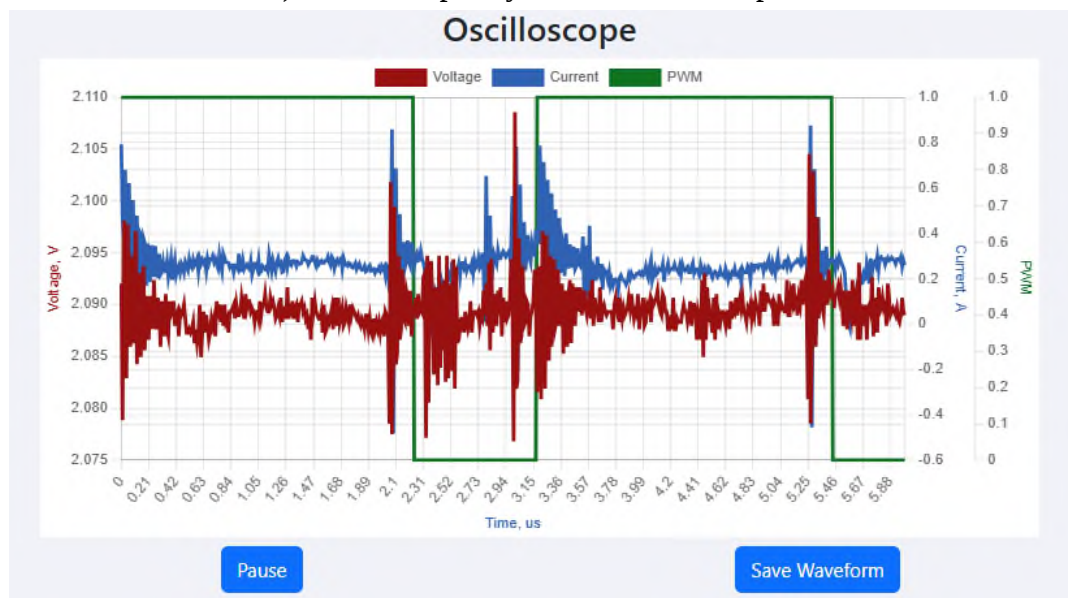


Fig. 7. View of Oscilloscope

Source: developed by the authors.

The final component of the web application is the chart pane labelled 'Output Voltage vs. PWM'. This section of the remote laboratory interface is designed to create a graphical dependency (chart) between output voltage in a circuit and PWM value in manual mode (Fig. 8).

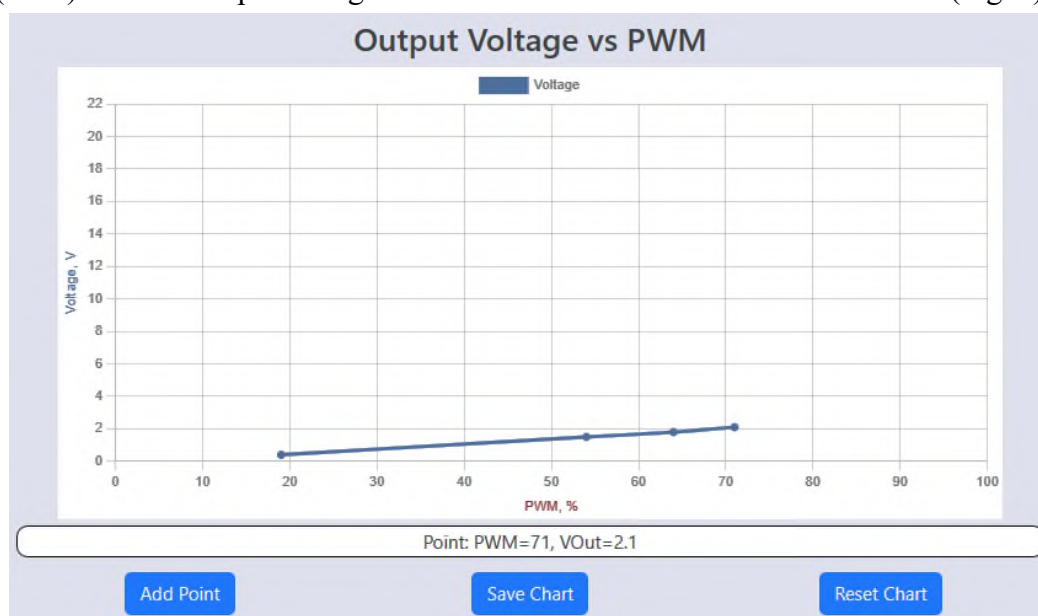


Fig. 8. View of Output Voltage vs PWM

Source: developed by the authors.

This part is used in conjunction with the control elements on the Schematic diagram of the converter. When the student sets the manual mode and selects some of PWM's duty cycle for the MOSFET switch, one point on the chart can be added by pressing the "Add Point" button below the chart. The information about the duty cycle and corresponding output voltage to be

added is also displayed under the chart. The student then needs to repeat the procedure iteratively for other duty cycle values to complete the chart for values from 0% to 100%. Two additional buttons are also provided for ease of use: to save the chart as a PNG file (Save Chart button) and to clear the chart of all existing points (Reset Chart button).

Another important aspect when implementing user interfaces is that they should be simple and not overcomplicated with different buttons, elements, etc. Furthermore, colors and fonts should be high contrast for better readability.

As a result, we have demonstrated the most important practical aspects for creating a remote laboratory user interface with security procedures based on the solution implemented in CPNU. Approaches for improving the user interface and user experience, used for the power electronics remote laboratory, can also be used for other remote laboratories. In the future, this remote laboratory web application can be improved by collecting statistics on students' usage for a better user experience.

Conclusions. Considering the large number of scientific literature on the subject, the issue of remote laboratory development is of considerable significance in the contemporary world. A thorough analysis of related studies has enabled the identification of the primary challenges that may emerge during the implementation of remote laboratories, including security, system performance, user interface, and optimisation. This study explores the potential of remote laboratories as a means for students to engage with the practical components of academic disciplines, with a particular focus on security and user interface/user experience considerations. The paper presents the practical aspects of remote power electronics laboratories, as implemented at Chernihiv Polytechnic National University, including the division of the system into an Experiment subsystem and a Security subsystem, both of which are controlled by the remote laboratory management system LabDiscoveryEngine. This approach enhances the security of remote laboratories. Several key approaches for improving the user experience were discussed and implemented, such as regulating queues through LabDiscoveryEngine functions and experiment timer in the web application, as well as the use of a single-page framework to create appropriate web applications. The use of appropriate input forms, as well as sensor indicators and their relative position on the schematic diagram of the experiment, was also considered a key element of the didactic approach, as well as user experience.

Finally, the user interface of the power electronics remote laboratory was presented and implemented on the experiment server based on Vue.js and Bootstrap, utilising all the aforementioned approaches for the enhancement of user experience for two experiments (buck and boost DC-DC converters). The findings of the research can also be applied to other human-machine interface implementations, extending beyond remote laboratories and academia, such as industrial automation systems. The next stage of development will be to collect statistics on student usage to further enhance the user experience of the remote laboratory web application. The proposed approaches will also be translated to other remote laboratories, such as microcontroller and FPGA systems, which are currently in development.

References

1. Cristaldi, I., Ferrero, A., Piuri, V. (1999). Programmable instruments, virtual instruments, and distributed measurement systems: What is really useful, innovative, and technically sound. *IEEE Instrum Meas Mag* 2(3) 20-27. <https://ieeexplore.ieee.org/document/783108>.
2. Ma, J., Nickerson, J. V. (2006). Hands-On, Simulated, and Remote Laboratories: A Comparative Literature Review. *ACM Computing Surveys*, (38)3. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/1132960.1132961>.
3. Balamuralithara, B., Woods, P. C. (2008). Virtual Laboratories in Engineering Education: The Simulation Lab and Remote Lab. *Computer Applications in Engineering Education*, 17(1), 108-118. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cae.20186>.

4. Ionescu, C. M., Fabregas, E., Cristescu, S. M., Dormido, S., De Keyser, R. (2013). A Remote Laboratory as an Educational Tool for Practicing Control Engineering Concepts. *IEEE Transactions on Education*, 56(4), 436-442 https://www.researchgate.net/publication/260710886_A_Remote_Laboratory_as_an_Innovative_Educational_Tool_for_Practicing_Control_Engineering_Concepts.
5. Chen, X., Song, G., Zhang, Y. (2010). Virtual and Remote Laboratory Development. *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*. https://www.researchgate.net/publication/228988059_Virtual_and_Remote_Laboratory_Development_A_Review.
6. Broisin, J., Venant, R., Vidal, P. (2017). Lab4CE: a Remote Laboratory for Computer education. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 27(1), 154-180. https://www.researchgate.net/publication/284122295_Lab4CE_a_Remote_Laboratory_for_Computer_Education.
7. Andújar, J. M., Mejías, A., Márquez, M. A. (2011). Augmented Reality for the Improvement of Remote Laboratories: An Augmented Remote Laboratory. *IEEE Transactions on Education*, 54(3), 492-500. https://www.researchgate.net/publication/224184472_Augmented_Reality_for_the_Improvement_of_Remote_Laboratories_An_Augmented_Remote_Laboratory.
8. Guimaraes, E. G., Cardozo, E., Moraes, D. H., Coelho, P. R. (2011). Design and Implementation Issues for Modern Remote Laboratories. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 4(2), 149-161. https://www.researchgate.net/publication/232619328_Design_and_Implementation_Issues_for_Modern_Remote_Laboratories_HTML.
9. Stone, D., Jarrett, C., Woodroffe, M., Minocha, S. (2005). User interface design and evaluation. Elsevier Science & Technology Books. https://books.google.com.ua/books?hl=en&lr=&id=VvSoyqPBPbMC&oi=fnd&pg=PR21&ots=d9L0PVsQM&sig=sZ-x3DNT2ojP3AX8NM83d0eqMBc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
10. Lab Discovery Engine. (2023). <https://labdiscoveryengine.labsland.com>.
11. Vue.js. (2025). <https://vuejs.org/>.
12. Bootstrap Framework. (2025). <https://getbootstrap.com/>.
13. Round Slider library. (2020). <https://roundsliderui.com/>.
14. Chart.js library. (n.d.). <https://www.chartjs.org/>.

Список використаних джерел

1. Cristaldi, I., Ferrero, A., Piuri, V. (1999). Programmable instruments, virtual instruments, and distributed measurement systems: What is really useful, innovative, and technically sound. *IEEE Instrum Meas Mag* 2(3) 20-27. <https://ieeexplore.ieee.org/document/783108>.
2. Ma, J., Nickerson, J. V. (2006). Hands-On, Simulated, and Remote Laboratories: A Comparative Literature Review. *ACM Computing Surveys*, (38)3. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/1132960.1132961>.
3. Balamuralithara, B., Woods, P. C. (2008). Virtual Laboratories in Engineering Education: The Simulation Lab and Remote Lab. *Computer Applications in Engineering Education*, 17(1), 108-118. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cae.20186>.
4. Ionescu, C. M., Fabregas, E., Cristescu, S. M., Dormido, S., De Keyser, R. (2013). A Remote Laboratory as an Educational Tool for Practicing Control Engineering Concepts. *IEEE Transactions on Education*, 56(4), 436-442 https://www.researchgate.net/publication/260710886_A_Remote_Laboratory_as_an_Innovative_Educational_Tool_for_Practicing_Control_Engineering_Concepts.
5. Chen, X., Song, G., Zhang, Y. (2010). Virtual and Remote Laboratory Development. *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*. https://www.researchgate.net/publication/228988059_Virtual_and_Remote_Laboratory_Development_A_Review.
6. Broisin, J., Venant, R., Vidal, P. (2017). Lab4CE: a Remote Laboratory for Computer education. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 27(1), 154-180. https://www.researchgate.net/publication/284122295_Lab4CE_a_Remote_Laboratory_for_Computer_Education.
7. Andújar, J. M., Mejías, A., Márquez, M. A. (2011). Augmented Reality for the Improvement of Remote Laboratories: An Augmented Remote Laboratory. *IEEE Transactions on Education*, 54(3), 492-500. https://www.researchgate.net/publication/224184472_Augmented_Reality_for_the_Improvement_of_Remote_Laboratories_An_Augmented_Remote_Laboratory.
8. Guimaraes, E. G., Cardozo, E., Moraes, D. H., Coelho, P. R. (2011). Design and Implementation Issues for Modern Remote Laboratories. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 4(2), 149-161. https://www.researchgate.net/publication/232619328_Design_and_Implementation_Issues_for_Modern_Remote_Laboratories_HTML.

9. Stone, D., Jarrett, C., Woodroffe, M., Minocha, S. (2005). User interface design and evaluation. Elsevier Science & Technology Books. https://books.google.com.ua/books?hl=en&lr=&id=VvSoyqPBPbMC&oi=fnd&pg=PR21&ots=d9L0PVsQMc&sig=sZ-x3DNT2ojP3AX8NM83d0eqMBc&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
10. Lab Discovery Engine. (2023). <https://labdiscoveryengine.labsland.com>.
11. Vue.js. (2025). <https://vuejs.org/>.
12. Bootstrap Framework. (2025). <https://getbootstrap.com/>.
13. Round Slider library. (2020). <https://roundsliderui.com/>.
14. Chart.js library. (n.d.). <https://www.chartjs.org/>.

Отримано 03.02.2025

УДК 004.51

**Богдан Олександрович Велігорський¹, Владислав Дмитрович Байда²,
Максим Анатолійович Хоменко³**

¹Фахівець третьої категорії НТП "Розвиток науково-інноваційної екосистеми
як основи сталої трансформації університету"

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: bogdan_vel@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4492-4156>

²студент аспірантури кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: Vladyslav.Baida@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2172-8057>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ>

³кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехнічних та вбудованих систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: mr.homax@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9084-3527>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=3K50Dg8AAAAJ>

ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ІНТЕРФЕЙСУ КОРИСТУВАЧА ВІДДАЛЕНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Розвиток світу інформаційних технологій дає можливість віддалено вирішувати велику кількість задач: замовляти їжу, читати книги, насолоджуватися творами мистецтва. Це ж саме стосується і навчального процесу. Для вивчення практичної частини різних дисциплін, у тому числі силових електроніки, коли аудиторні заняття неможливі або становлять ризик, у пригоді стають віддалені лабораторії. Вони допомагають здобувачам освіти, які живуть у місцях масового поширення хвороб та військових конфліктів, адже для навчання в цьому випадку потрібні лише пристрої з доступом до Інтернету та сам стабільний Інтернет.

Однак завжди актуальною є проблема якості та корисності таких технологій, яка багато в чому залежить від реалізованого інтерфейсу користувача. Саме тому велику увагу при розробці слід приділяти інтерфейсу користувача віддалених лабораторій, у тому числі пов'язаних із силовою електронікою. Детальне дослідження цієї теми забезпечить краще врахування досвіду використання та кращі відгуки від студентів. Крім того, це спростить процес майбутнього впровадження віддалених лабораторій.

Актуальні дослідження щодо впровадження віддалених лабораторій показали, що мало уваги приділяється конкретним елементам інтерфейсу користувача, які використовуються у відповідних системах, та обґрунтуванню вибору елементів.

Метою цієї статті є висвітлення проблем, які можуть виникнути під час впровадження інтерфейсу користувача віддалених лабораторій силових електроніки, та запропонування практичних аспектів його спрощення на основі реальної системи.

За результатами проведених досліджень запропоновано декомпозицію інтерфейсу користувача на фронтенд-підсистему з використанням односторінкових вебзастосунків для клієнтської частини. Дано пояснення елементів для розмітки сторінки дистанційної лабораторії силових електроніки та зовнішнього вигляду сторінки, включаючи різні панелі, графіки, кнопки, перемикачі тощо.

У цій роботі на реальному прикладі продемонстровано загальний підхід до створення інтерфейсу користувача віддаленої лабораторії силових електроніки. Наведено проблеми, які можуть виникнути. Представлені матеріали можуть бути використані для більш спрощення розробки майбутніх систем віддалених лабораторій.

Ключові слова: віддалена лабораторія; інтерфейс користувача; силова електроніка; вебзастосунок; фреймворк Vue.js; front-end.

Рис.: 8. Бібл.: 14.

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2025-1(39)-218-230

УДК 664.34

Тетяна Геннадіївна Філінська¹, Антоніна Олександрівна Філінська²

¹кандидат технічних наук,

доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції

Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)

E-mail: fl11nskaya@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989>

²старший викладач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції

Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)

E-mail: antoniyafilin@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>

ЕМУЛЬСІЇ ПІКЕРІНГА. ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ В МАЙОНЕЗНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Майонези і майонезні соуси являють собою харчові водно-жирові емульсії прямого типу «олія у воді». Для формування стійкої структури такої емульсійної системи, що складається з двох незмішуваних рідин, використовують емульгатори – поверхнево активні речовини дифільної будови, які формують своєрідний бар'єрний шар між водою і краплями жирової фази, запобігаючи процесу коалесценції та розшиарування. Сучасні підходи до створення якісних, безпечних, фізично і хімічно стійких емульсійних продуктів базуються на рецептурних та процесних інноваціях і можуть бути розширені за рахунок виготовлення майонезних емульсій Пікерінга.

Представлені у статті матеріали мають оглядовий характер. Вони містять аналіз існуючих напрямів виготовлення нових видів майонезних продуктів, інформацію про особливості формування майонезних емульсій Пікерінга з використанням емульгаторів різної природи, властивості і способи модифікації емульгаторів Пікерінга та умови їх використання.

Ключові слова: майонезна продукція; рецептурні компоненти; інновації; емульсії Пікерінга, модифікація, поверхнево активні речовини; функціональні добавки.

Рис.: 2. Бібл.: 42.

Актуальність теми дослідження. Майонезні продукти, які в Україні представлені майонезами і майонезними соусами, являють собою водно-жирові емульсії прямого типу. У них дисперсна фаза (жир) у дрібнокрапельному стані рівномірно розподілена в дисперсному середовищі (вода). Традиційно стабільність емульсійної системи забезпечують емульгатори – сполуки дифільної будови, які формують своєрідний бар'єрний шар між водою і краплями жирової фази, запобігаючи процесу коалесценції. Природним емульгатором слугує яєчний жовток, його високу емульгуючу здатність зумовлює присутність у складі лецитину. Сухе молоко також має функцію емульгатора і структуроутворювача. Здатність білків молока до набухання покращує вологоутримування і забезпечує структурну дію на весь комплекс речовин, що входять до складу майонезу. Найкращі властивості виявляє молоко розпилювального сушіння. Гірчичний порошок, завдяки вмісту в ньому гірчичної алілової олії, є смаковою добавкою і одночасно виконує функції емульгатора та структуроутворювача за рахунок присутності рослинних білків. Найчастіше в сучасному виробництві майонезної продукції використовують синтетичні емульгатори – поверхнево-активні речовини (ПАР). Серед рецептурних компонентів присутні також водо- і жиророзчинні функціональні Е-добавки: підсолонджені, цукрозамінники, ароматизатори, антиоксиданти, консерванти, згущувачі та ін. [1; 2].

Сучасні тенденції до зменшення у складі майонезних продуктів хімічних інгредієнтів, які несуть потенційні ризики для здоров'я споживачів, заміни їх на натуральні аналоги та зростаючий попит на безяєчні майонезні соуси, потребують інтеграції у майонезне виробництво передових технологій. Останні мають сприяти виготовленню якісної і безпечної майонезної продукції, яка була б стійкою до фізичної і хімічної дестабілізації.

Постановка проблеми. Вдосконалення майонезних виробництв великою мірою пов'язані з продуктовими (рецептурними) інноваціями. За такого підходу коригується рецептурний склад, тоді як теоретичні засади процесів створення емульсійних продуктів із використанням ПАР залишаються незмінними. Приділяється увага і питанням вдосконалення технології виготовлення майонезних продуктів (процесні інновації) з використанням спеціальних установок (магнітогідродинамічних пристроїв, реакторів з обертовим диском), виконання гомогенізації під надвисоким тиском [3-5].

Харчові емульсії можуть бути дестабілізовані як з фізичного, так і з хімічного погляду. Фізичній дестабілізації зазвичай запобігає використання звичайних емульгаторів, таких як ПАР та білки. Хімічна дестабілізація, зокрема окислення ліпідів, є серйозною проблемою в майонезних продуктах, особливо коли вони містять у своєму складі корисні поліненасичені жирні кислоти. Така деградація зазвичай пом'якшується використанням синтетичних антиоксидантів, часто у великих кількостях. Тож нагальним залишається пошук і аналіз можливості використання в майонезному виробництві нових підходів до створення якісних, безпечних і стійких емульсійних продуктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед сучасних тенденцій створення корисної майонезної продукції особливе місце відводиться розробленню рецептур, які не містять яєць і яйцепродуктів. Це майонезні соуси спеціального призначення.

Виробництво яєць створює етичні та екологічні проблеми, особливо з погляду благополуччя тварин, викидів парникових газів та використання води. До того ж яйця є поширеним алергеном, що обмежує доступ до традиційного (яєчного) майонезу людям із дієтичними обмеженнями чи алергією. Тому дедалі більше споживачів у відповідь на ці побоювання віддають перевагу рослинній альтернативі традиційного яєчного майонезу. Веганський майонезний соус розглядається як нешкідливий для навколишнього середовища, який до вподоби і споживачам, що дбають про довкілля.

Популярним заміником яєць слугує аквафаба – в'язка рідина, що утворюється при варінні бобових, наприклад, нуту. Аквафаба містить різні поживні речовини, включаючи білок, полісахариди, мінерали та фітохімічні сполуки (сапоніни та фенольні сполуки), які сприяють її функціональності (піноутворення, емульгування, гелеутворення та загущення). Аквафаба виявляє емульгуючі властивості, аналогічні властивостям яєчного білка, що робить її ідеальною заміною в рецептурах майонезу. Збиваючи аквафабу з олією та оцтом або лимонним соком, виробники створюють заміник яєчного майонезу, який не поступається традиційній версії продукту за смаком та текстурою [6; 7].

Склад аквафаби залежить від природи сировини (складу, сорту та генотипу) і умов екстракції, таких як замочування насіння перед приготуванням, співвідношення насіння та води, температури, рН, часу і тиску під час екстракції. Фізичні властивості аквафаби, включаючи рН, в'язкість, водо- та жиропоглинаючу здатність, визначають її функціональні властивості. Аквафаба з нуту та інших бобових має злегка кислий рівень рН: зі значеннями 6,07 для аквафаби з квасолі та жовтої сої; 6,26 – для аквафаби з нуту; 6,39 – для аквафаби з колотого жовтого горошку; 6,47 – для аквафаби з зеленої сочевиці. При нижчому рН позитивні заряди білка збільшуються, що, впливає на гідрофобність [8-10].

Інший поширений метод заміни яєць – використання білків, отримуваних з рослинних джерел і комах. Ці інгредієнти допомагають стабілізувати емульсію та створювати належну текстуру, дозволяючи майонезу зберігати свою консистенцію без необхідності додавання яєць. На сьогодні виготовлені й досліджені зразки безяєчного майонезу, стабілізовані білками, одержаними з личинок *Tenebrio molitor* [11].

У харчовій промисловості традиційно використовуються емульгатори на основі сої [12]. Соеві боби містять близько 40 % білка і 20 % олії та вважаються доступною сировиною для одержання натуральних ПАР: соєвого білка, соєвого лецитину та соєвих полісахаридів. Слід зазначити, що функціональні властивості емульгаторів на основі сої можуть різнитися. Наприклад, розчинність комерційних емульгаторів залежить від методу екстракції та оброблення, які застосовуються в процесі їх виготовлення [13]. Для часткової заміни яєчного жовтка в рецептурах низькожирних майонезів пропонують використовувати ізолят і концентрат соєвого білка. Останній виявляє дещо нижчу емульгуючу активність у порівнянні з соєвим ізолятом [14]. З метою покращення емульгуючих властивостей ізолятів соєвого білка їх піддають модифікації [15].

Альтернативою соєвому білку може слугувати білок з гороху. Він виявляє аналогічні функціональні властивості, що і соєвий білок, але є менш алергенним. Горох має високу харчову цінність та значний вміст лізину, є джерелом біоактивних пептидів, які можуть забезпечувати антиоксидантну активність [16]. Порівняно з деякими іншими білками бобових, такими як нут і кінські боби, горох має нижчу щільність поверхневого заряду, більш гідрофобну структуру поверхні і відносно погану розчинність, що може обмежувати його застосування для емульгування. Білки гороху також мають складну молекулярну структуру, і їхня глобулярна форма може обмежувати потенціал емульгування через наявність компактної третинної структури, яка обмежує молекулярну гнучкість.

Покращити емульгуючі властивості горохового білка можливо шляхом модифікації, використовуючи комплексоутворення та ферментативний гідроліз. Кислотно-модифікований ізолят горохового білка сумісно з кристалами целюлози окари (соєвої пульпи, одержуваної при виробництві соєвого молока з високим вмістом клітковини та білку) сприяє покращенню фізико-хімічної стабільності майонезу без яєць зі зниженим вмістом жиру [17].

Ізоляти білків бобових мають хорошу здатність до емульгування при рН 3, що робить їх особливо придатними для виробництва майонезних емульсій з низьким рН. Білки з нуту, квасолі кінської і жовтої сочевиці, в дослідженнях щодо їх впливу на текстурні й сенсорні властивості отримуваних зразків майонезу без яєць, підтвердили ефективність їх використання в рецептурах веганських продуктів. Взяті для випробувань зразки ізоляту білка з нуту (вміст білка 70 г/100 г), концентрату білка квасолі кінської (вміст білка 60 г/100 г) та концентрату білка з жовтої сочевиці (вміст білка 55 г/100г) забезпечили утворення стабільних емульсій [18]. Встановлено, що на фізико-функціональні властивості білка квасолі, отриманого ферментативною екстракцією, впливають дози та тривалість дії ферменту, потужність та час оброблення ультразвуком [19]. Досліджено можливість використання білкових гідролізаторів паростків конюшини, а також ізоляти білка зародків пшениці, для повної або часткової заміни яєць під час виробництва майонезу, вивчено їхній вплив на фізико-хімічні та органолептичні властивості продукту [20; 21].

Замінити яєчний жовток у виробництві майонезних соусів здатні сирні порошки. Зразки, виготовлені на основі Камамберу (з додаванням і без додавання емульгуючої солі) та на основі Чеддера, забезпечували належне емульгування жиру, але виявилися менш здатними зв'язувати воду. Майонезний продукт, приготований з використанням сирного порошку Чеддер, показав найбільший ступінь схожості з яєчним майонезом за реологічними властивостями та стабільністю. Однак використання молочних білків у рецептурах безяєчних майонезів може викликати стурбованість, пов'язану з поширенням таких захворювань, як губчастий енцефаліт великої рогатої худоби, та можливою присутністю інших патогенів [22].

Хімічну та мікробіологічну стійкість майонезних продуктів забезпечують антиоксиданти й консерванти. До останніх можна віднести сорбінову (E200) і бензойну (E210) кислоти та їх солі (E201, E202, E211 і E212) [23]. До антиоксидантів, широко використовуваних у майонезному виробництві, відносять: аскорбілпальмітат (E304), бутилгідроксіанізол (E320), бутилгідроксітолуол (E321). У зв'язку з вимогами ринку щодо зменшення використання синтетичних антиоксидантів було вивчено безліч джерел рослинного походження та ідентифіковано численні види рослин з різною антиоксидантною активністю. Антиоксидантні властивості виявляють, наприклад, фенольні сполуки рослинного походження. Сильний фенольний характер притаманний для ефірних олій материнки звичайної (*Origanum vulgare*), чебрецю (*Thymus vulgaris* L.), чебрецю дикого (*Thymus serpyllum* L.), розмарину (*Rosmarinus officinalis*), шавлії (*Salvia officinalis*), кориці (*Cinnamomum verum*), гвоздики (*Syzygium Aromaticum*), запашного перцю (*Pimenta dioica*), імбиру (*Zingiber officinale*), куркумі (*Curcuma longa*) та паприці (*Capsicum annuum*) [24].

Навіть ефірні олії з низькою антиоксидантною дією можуть бути проміжними продуктами при утворенні інших сполук з високою антиоксидантною активністю, наприклад ліналоол. Останній можна використовувати як проміжний продукт у синтезі вітаміну Е, що володіє високою антиоксидантною активністю. Розмаринова, кавова, кумарова кислоти, кверцетин, тимол і карвакрол є відповідальними за антиоксидантну активність різних ефірних олій. Наприклад, дослідники дійшли висновку, що антиокислювальна активність ефірної олії материнки сильно залежить від вмісту в ній карвакролу (монотерпеноїд фенолу) та тимолу (ізомер карвакролу). Як висновок, вказані ефірні олії у складі майонезних продуктів виконують функції не лише смако-ароматичних добавок і носіїв корисних нутрієнтів, а й слугують природними антиоксидантами.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх публікацій показав, що питанням створення стійких майонезних продуктів як з фізичного, так і з хімічного погляду, приділяється значна увага. Запропоновано велику кількість замінників яєць і яйцепродуктів у рецептурному складі майонезних соусів, розроблено рецептури з природними антиоксидантами. Однак при цьому виготовлення інноваційних майонезних продуктів базується на традиційних процесах формування стабільних емульсій із використанням ПАР дифільної будови.

Метою статті є дослідження процесів виготовлення майонезних емульсій Пікерінга з використанням емульгаторів різної природи; вивчення властивостей і способів модифікації емульгаторів, а також особливостей їх використання і безпечність застосування в майонезному виробництві.

Виклад основного матеріалу. Емульсії можуть бути утворені і стабілізовані не лише за участі ПАР дифільної будови, але і твердими частинками, утворюючи так звані емульсії Пікерінга. Механізм формування такої емульсії, стабілізованої твердими частинками, полягає в ефективній та незворотній адсорбції диспергованих частинок на межі розділу олія-вода з утворенням механічних бар'єрів навколо крапель емульсії.

При цьому тверді частинки спочатку накопичуються на межі розділу фаз (рис. 1, а), потім формують щільну структуру (рис. 1, б), яка надалі може частково розвпорядковуватися в об'ємні агрегати (рис. 1, в). Електростатичне відштовхування між твердими частинками сильно ускладнює коалесценцію крапель та запобігає розшаруванню емульсії [25].

Такі характеристики твердих частинок (емульгаторів Пікерінга), як їхній розмір, форма, показник змочування, концентрація, взаємодія та їх об'єднання, відіграють важливу роль у властивостях та стабільності отримуваних емульсій. Загальновідомо, що чим менший розмір твердих частинок, тим вище співвідношення сторін і проміжна змочуваність,

тим вище їхні емульгуючі властивості. На сьогодні зусилля науковців та дослідників зосереджені на виробництві різних типів наночастинок та мікрочастинок, від неорганічних до органічних, які не тільки ефективні для стабілізації емульсій Пікерінга, але й прийнятні для використання у харчових продуктах.

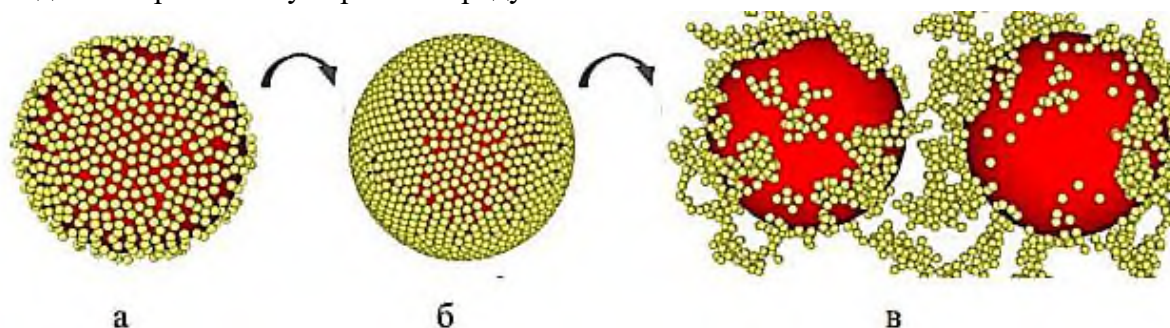


Рис. 1. Формування емульсії Пікерінга

Джерело: [25].

Природні біополімери, такі як полісахариди, наприклад, гідрофобно модифіковані гранули крохмалю, нанокристали хітину, стають перспективним джерелом дисперсного матеріалу для використання в харчових продуктах. Целюлоза, що є найбільш поширеним біополімером на Землі, також відмінний кандидат для міжфазної стабілізації емульсій Пікерінга через її відновлюваність, стійкість, біорозкладність і нетоксичність. Фіточастинки – похідні рослин, такі як білки, полісахариди та воски, дедалі частіше використовуються для стабілізації емульсій Пікерінга в рецептурах нових харчових колоїдних дисперсій [26; 27].

Методи отримання емульсій Пікерінга практично ідентичні тим, що використовуються для класичних емульсій. Механізм протікання процесу подібний виготовленню майонезних емульсій з використанням ПАР (рис. 2) [25].

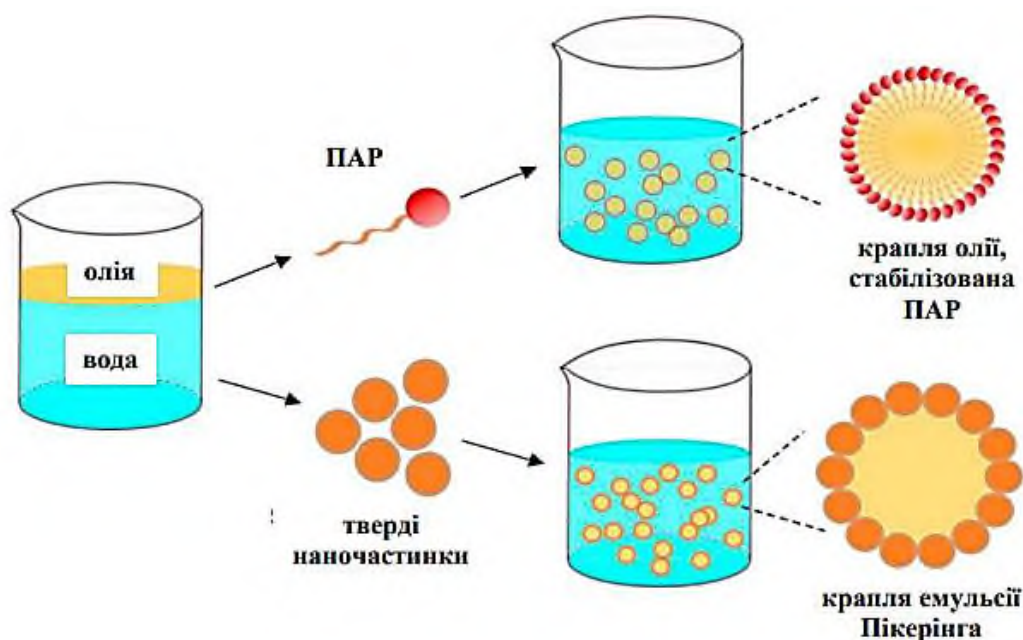


Рис. 2. Схематичне зображення процесу утворення емульсій різних типів
Джерело: [25].

Для виготовлення стійких емульсій Пікерінга широко використовують наночастинки на основі крохмалів, одержаних з різної сировини (картоплі, рису, кукурудзи, кіноа, ама-ранту та ін.). Для покращення емульгуючих властивостей крохмалі піддають модифікації, наприклад, гідрофобізації октенілянтарним ангідридом [28-33].

Перспективними стабілізаторами для емульсій Пікерінга слугують наноцелюлозні матеріали, наприклад, нанокристали целюлози, виготовлені зі стебла спаржі (*Asparagus officinalis* L.). Зразки одержували гідролізом сірчаною кислотою, змінюючи тривалість процесу від 1,5 до 3,5 годин). Розміри нанокристалів варіювалися від 178,2 до 261,8 нм, їхня кристалічність була в межах 72,4...77,2 %. У модельному розчині пальмова олія/вода (об'ємне співвідношення 30:70 відповідно), при додаванні одержаних наноцелюлозних стабілізаторів формувалися стійкі емульсії Пікерінга. Також досліджено властивості та стабільність емульсій прямого типу, стабілізованих мікрофібрильованою целюлозою зі шкірки мангостину [34; 26].

Виготовлена їстівна майонезоподібна емульсія Пікерінга, стабілізована мікрогелями ізолату горохового білка. Досліджено вплив оцтової кислоти (pH), хлориду натрію (NaCl) та сахарози, які зазвичай використовуються у комерційному майонезі. Виготовлені дослідні зразки емульсії Пікерінга, що не містить яєць, показали аналогічні властивості в порівнянні з комерційним майонезом, а ступінь відновлення тиксотропії склала близько 100 % [35]. Ефективними стабілізаторами для емульсій Пікерінга з 50 % об'ємною часткою кукурудзяної олії можуть слугувати модифіковані білки гороху, отримані шляхом термічного оброблення, коригуванням pH до 9 та додаванням аскорбінової кислоти [36].

Слугувати альтернативою майонезоподібному харчовому соусу можуть емульсії Пікерінга, стабілізовані твердими дисперсними частинками на основі куркуміну, з використанням карагінану в якості матричного матеріалу. Виготовлені емульсії були протестовані на предмет кольорних характеристик, pH, окисної стабільності, текстурного та поживного складу і порівняні з двома комерційними майонезами (традиційним та низькожирним продуктом). Загалом отримані емульсії характеризувалися яскраво-жовтим кольором (привабливим для споживачів атрибутом), кислим pH (аналогічно майонезу) і значно поліпшеною окислювальною стабільністю, що передбачає більш тривалий термін зберігання. Вони мали текстуру, аналогічну легкому комерційному майонезу, і можуть розглядатися як багатообіцяюча альтернатива звичайним соусам з низьким вмістом жиру та потенційно додатковими перевагами завдяки особливим властивостям куркуміну [37].

Розроблені водно-жирові емульсії з високим вмістом внутрішньої фази основі цитрусових волокон та кукурудзяних пептидів. Кукурудзяні пептиди, отримувані шляхом ферментативного гідролізу кукурудзяного білка, продемонстрували чудові амфіфільні властивості у водному розчині, які були вивчені для наноносіїв біоактивних компонентів та емульгатора Пікерінга. Багатофункціональні пептиди кукурудзи виявляють низьку алергію і мають великий потенціал для застосування у харчових продуктах. Цитрусові волокна, отримані з м'якоті апельсина, слугують чудовим джерелом харчових волокон завдяки добре збалансованому співвідношенню розчинних і нерозчинних волокон. Волокна цитрусових використовуються в емульгованих харчових системах для покращення текстурних властивостей та стабільності емульсійних систем із низьким вмістом олії завдяки наявності білкових залишків у пектинах (розчинних волокнах). Виготовлені емульсії з високим вмістом (75 мас.%) соняшникової олії, характеризуються високою термостабільністю, хорошим відновленням при заморожуванні-відтаюванні та наднизькими трибологічними властивостями. Частинки кукурудзяних пептидів і розчинне волокно, функціоналізоване пептидами кукурудзи, сприяють створенню структури міжфазної межі, а нерозчинне волокно наповнюється в безперервній фазі, що приводить до стабільних емульсій у кислих умовах (pH 3) [38].

Останнім часом інтенсивний дослідницький інтерес викликають стабілізатори Пікерінга з харчових побічних продуктів та натуральних матеріалів. Наприклад, для стабілізації майонезу без холестерину, виготовленого на основі емульсії Пікерінга, пропонується використовувати яблучні вичавки. Такий стабілізатор не тільки сприяє більш ефективному використанню харчових побічних продуктів, а також приносить користь здоров'ю людини, забезпечуючи високоякісними харчовими волокнами та антиоксидантами (переважно поліфенолами та флавоноїдами) [39; 40]. Одержаний емульсійний продукт задовольняє за реологічними властивостями, демонструє високу стабільність емульсії протягом 210 діб за температури 25 °С, а також створює нові можливості щодо використання побічних продуктів харчової галузі. Майонез без жовтка був отриманий за допомогою емульсій Пікерінга, стабілізованих вільними та інкапсульованими екстрактами оливкових вичавок у насінні руколи (наночастинки камеді насіння) та наночастинках камеді насіння чіа при різних концентраціях. Результати оцінювання фізико-хімічних та реологічних властивостей отриманих зразків майонезу вказують на доцільність використання оливкових вичавок та натуральних камедей рослинного походження для виробництва майонезних продуктів [41].

Як зазначалося вище, не лише фізична стабільність (стійкість емульсії), а й хімічна стійкість (окисна) забезпечують якісні показники майонезної продукції і тривалий термін зберігання.

Під час дослідження потенційної здатності емульсій Пікерінга підвищувати окисну стабільність емульсій прямого типу було виявлено, що збільшення концентрації частинок мікрокристалічної целюлози (МКЦ) і модифікованого крохмалю (МК) з 0,1 до 2,5 % зменшує розмір крапель, підвищує фізичну стабільність емульсій і знижує швидкість окислення ліпідів через утворення більш товстого міжфазного шару навколо крапель олії. Встановлено, що частинки МКЦ здатні знижувати швидкість окислення ліпідів ефективніше, ніж частинки МК. Це пояснюється здатністю вловлювати вільні радикали за рахунок їхнього негативного заряду й утворювати товстіші міжфазні шари навколо крапель олії через відмінності в розмірах частинок. Виконане дослідження демонструє, що маніпулювання мікроструктурою використовуваних емульгаторів, формування товстого їх шару навколо крапель олії є ефективним підходом до уповільнення окислення ліпідів [42]. Підвищити окисну стабільність емульсій Пікерінга можна введенням до складу емульгатора додаткових компонентів з антиоксидантними властивостями (наприклад, куркуміну) [37].

Висновки. На підставі викладеного матеріалу можемо зробити висновок, що сучасні підходи до вдосконалення майонезних виробництв за рахунок створення якісних і безпечних емульсійних продуктів, які базуються на рецептурних та процесних інноваціях, можуть бути розширені за рахунок виготовлення майонезних емульсій Пікерінга. Вони стабілізуються твердими частинками, які адсорбуються на межі розділу олія-вода з утворенням механічних бар'єрів навколо жирових крапель емульсії. Емульгаторами Пікерінга можуть слугувати природні біополімери: модифіковані гранули крохмалю, мікрокристалічна целюлоза та ін.

Екологічність виробництв і впровадження ресурсозберігаючих технологій реалізується при виготовленні майонезних емульсій Пікерінга за рахунок використання відходів і побічних продуктів перероблення рослинної сировини (яблучні, оливкові вичавки та ін.). Останні містять у своєму складі корисні нутрієнти, харчові волокна та антиоксиданти (поліфеноли, флавоноїди), які, безперечно, несуть користь здоров'ю споживачів.

Список використаних джерел

1. ДСТУ 4487:2015 Майонези та майонезні соуси. Загальні технічні умови. (2016). Держспоживстандарт України.
2. Філінська, Т., Філінська А. (2024). Рецептурні інновації як складові трансформації ринку майонезної продукції. *Технічні науки та технології*, 1(35). С. 212-224. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-212-224](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-212-224)
3. Aganovic, K., Bindrich, U., Heinz, V. (2018). Ultra-high pressure homogenisation process for production of reduced fat mayonnaise with similar rheological characteristics as its full fat counterpart. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 45, 208-214. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.10.013>.
4. Kerkhofs, S., Lipkens, H., Velghe, F., Verlooy, P., Martens, J.A. (2011). Mayonnaise production in batch and continuous process exploiting magnetohydrodynamic force. *Journal of Food Engineering*, 106(1), 35-39. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.04.003>.
5. Akhtar, M., Murray, B. S., Dowu S. (2014). A novel continuous process for making mayonnaise and salad cream using the spinning disc reactor: Effect of heat treatment. *Food Hydrocolloids*, 42(1), 223-228. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.06.007>
6. Ozcan, I., Ozyigit, E., Erkok, S., Tavman, S., Kumcuoglu, S. (2023). Investigating the physical and quality characteristics and rheology of mayonnaise containing aquafaba as an egg substitute. *Journal of Food Engineering*, 344, 111388. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111388>
7. He, Y., Purdy, S. K., Tse, T. J., Tar'an, B., Meda, V., Reaney, M. J. T., Mustafa, R. (2021). Standardization of Aquafaba Production and Application in Vegan Mayonnaise Analogs. *Foods*, 10(9), 1978. <https://doi.org/10.3390/foods10091978>
8. Menezes, R., Carvalho Gomes, Q., Almeida, B., Matos, M., Pinto, L. (2022). Plant-based mayonnaise: Trending ingredients for innovative products. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 30, 100599. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100599>
9. He, Y., Meda, V., Reaney, M. J. T., Mustafa, R. (2021). Aquafaba, a new plant-based rheological additive for food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 27-42. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.035>
10. Lafarga, T., Villaró, S., Bobo, G., Aguiló-Aguayo, I. (2019). Optimisation of the pH and boiling conditions needed to obtain improved foaming and emulsifying properties of chickpea aquafaba using a response surface methodology. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 18, 100177. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2019.100177>
11. Gkinali, A., Matsakidou, A., Moschakis, T., Paraskevopoulou, A. (2024). Egg-free mayonnaise-type emulsions stabilized with proteins derived from the larvae of *Tenebrio molitor*. *Food Hydrocolloids*, 156, 110249. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110249>
12. Deng, L. (2021). Current Progress in the Utilization of Soy-Based Emulsifiers in Food Applications – A Review. *Foods*, 10(6), 1354. <https://doi.org/10.3390/foods10061354>
13. Tang, C.-H. (2017). Emulsifying properties of soy proteins: A critical review with emphasis on the role of conformational flexibility. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr*, 57, 2636–2679. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1067594>
14. Heikal, Y., Hassan, A., Abou-Arab, A., Abu-Salem, F., Azab, D. (2023). Nano formulated soy proteins as a fat replacer in low fat mayonnaise formula. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 22(7), 469-479. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2023.04.006>
15. Chen, L., Chen, J., Ren, J., Zhao, M. (2011). Modifications of soy protein isolates using combined extrusion pre-treatment and controlled enzymatic hydrolysis for improved emulsifying properties. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 887-897. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.08.013>
16. Burger, T. G., Zhang, Y. (2019). Recent progress in the utilization of pea protein as an emulsifier for food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.007>
17. Prabsangob, N., Udomrati, S. (2024). Acid-modified pea protein isolate and okara cellulose crystal: A co-emulsifier to improve physico-chemical stability of fat-reduced eggless mayonnaise. *Future Foods*, 9, 100298. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100298>

18. Armaforte, E., Hopper, L., Stevenson, G. (2021). Preliminary investigation on the effect of proteins of different leguminous species (*Cicer arietinum*, *Vicia faba* and *Lens culinaris*) on the texture and sensory properties of egg-free mayonnaise. *LWT*, 136(2), 110341. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110341>.
19. Ouraji, M., Alimi, M., Motamedzadegan, A., Shokoohi, S. (2020). Faba bean protein in reduced fat/cholesterol mayonnaise: extraction and physico-chemical modification process. *J Food Sci Technol*, 57(5), 1774-1785. doi: 10.1007/s13197-019-04211-9.
20. Mirsadeghi Darabi, D., Ariaei, P., Safari, R., Ahmadi, M. (2022). Effect of clover sprouts protein hydrolysates as an egg substitute on physicochemical and sensory properties of mayonnaise. *Food Science & Nutrition*, 10(1), 253-263. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2665>.
21. Rahbari, M., Aalami, M., Kashaninejad, M., Maghsoudlou, Y., Aghdaei, S.S. (2015). A mixture design approach to optimizing low cholesterol mayonnaise formulation prepared with wheat germ protein isolate. *J Food Sci Technol*, 52(6), 3383-3393. doi: 10.1007/s13197-014-1389-4.
22. Felix da Silva, D., Bettera, L., Ipsen, R., Hougaard, A. B. (2021). Cheese powders as emulsifier in mayonnaise. *LWT*, 151, 112188. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112188>.
23. Yazdanfar, N., Manafi, L., Ebrahiminejad, B., Mazaheri, Ye., Sadighara, P., Basaran, B., Mo-hamadi, S. (2023). Evaluation of Sodium Benzoate and Potassium Sorbate Preservative Concentrations in Different Sauce Samples in Urmia, Iran. *Journal of Food Protectionm*, 86(8), 100118. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2023.100118>.
24. Gomes, I. A., dos Santos Gomes, F., Freitas-Silva, O., Passos Lima da Silva, J. (2017). Ingredients of mayonnaise: Future perspectives focusing on essential oils to reduce oxidation and microbial counts. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 67(3). <https://www.alanrevista.org/ediciones/2017/3/art-4>.
25. Філінська, Т. Г., Філінська А. О. (2025). Майонезна продукція. Рецентурні інновації : монографія. Укр. держ. ун-т науки і технологій ННІ УДХТУ.
26. Winuprasith, T., Suphantharika, M. (2015). Properties and stability of oil-in-water emulsions stabilized by microfibrillated cellulose from mangosteen rind. *Food Hydrocolloids*, 43, 690-699. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.07.027>.
27. Jafari, S.M., Doost, A.S., Nasrabadi, M.N., Boostani, S., der Meeren, P.V. (2020). Phytoparticles for the stabilization of Pickering emulsions in the formulation of novel food colloidal dispersions. *Trends in Food Science & Technology*, 98, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.008>.
28. Matos, M., Marefati, A., Barrero, P., Rayner, M., Gutiérrez, G. (2021). Resveratrol loaded Pickering emulsions stabilized by OSA modified rice starch granules. *Food Research International*, 139, 109837. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109837>.
29. Ye, F., Miao, M., Jiang, B., Campanella, O.H., Jin, Z., Zhang, T. (2017). Elucidation of stabilizing oil-in-water Pickering emulsion with different modified maize starch-based nanoparticles. *Food Chemistry*, 229, 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.062>.
30. Li, S., Zhang, B., Li, C., Fu, X., Huang, Q. (2020). Pickering emulsion gel stabilized by octenylsuccinate quinoa starch granule as lutein carrier: Role of the gel network. *Food Chemistry*, 305, 125476. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125476>.
31. Marefati, A., Wiege, B., Haase, N.U., Matos, M., Rayner, M. (2017). Pickering emulsifiers based on hydrophobically modified small granular starches – Part I: Manufacturing and physico-chemical characterization. *Carbohydrate Polymers*, 175, 473-483. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.07.044>.
32. Jia, Y., Kong, L., Zhang, B., Fu, X., Huang, Q. (2022). Fabrication and characterization of Pickering high internal phase emulsions stabilized by debranched starch-capric acid complex nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 207, 791-800. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.142>.
33. Leal-Castañeda, E.J., et al. (2018). Pickering emulsions stabilized with native and lauroylated amaranth starch. *Food Hydrocolloids*, 80, 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.043>.

34. Wang, W., Du, G., Li, C., Zhang, H., Long, Y., Ni, Y. (2016). Preparation of cellulose nanocrystals from asparagus (*Asparagus officinalis* L.) and their applications to palm oil/water Pickering emulsion. *Carbohydrate Polymers*, 151, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.052>.
35. Li, S., Jiao, B., Meng, S., Fu, W., Faisal, S., Li, X., Liu, H., Wang, Q. (2022). Edible mayonnaise-like Pickering emulsion stabilized by pea protein isolate microgels: Effect of food ingredients in commercial mayonnaise recipe. *Food Chemistry*, 376, 131866. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131866>.
36. Fazelioukouei, T., Tabibiazar, M., Mohammadifar, M., Masoumi, B., Homayouni-rad, A. (2023). Fabrication and characterization of food-grade pea protein-ascorbic acid nanoparticles-stabilized Pickering emulsion. *Journal of Molecular Liquids*, 388, 122829. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122829>.
37. Ghirro, L.C., et al. (2022). Pickering Emulsions Stabilized with Curcumin-Based Solid Dispersion Particles as Mayonnaise-like Food Sauce Alternatives. *Molecules*, 27(4), 1250. <https://doi.org/10.3390/molecules27041250>.
38. Ruan, Q., Yang, X., Zeng, L., Qi, J. (2019). Physical and tribological properties of high internal phase emulsions based on citrus fibers and corn peptides. *Food Hydrocolloids*, 95, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.014>.
39. Lu, Z., Zhou, S., Ye, F., Zhou, G., Gao, R., Qin, D., Zhao, G. (2021). A novel cholesterol-free mayonnaise made from Pickering emulsion stabilized by apple pomace particles. *Food Chem.*, 353, 129418. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129418>.
40. Lu, Z., Ye, F., Zhou, G., Gao, R., Qin, D., Zhao, G. (2020). Micronized apple pomace as a novel emulsifier for food O/W Pickering emulsion. *Food Chem.*, 330, 127325. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127325>.
41. Akcicek, A., Karasu, S., Bozkurt, F., Kayacan, S. (2022). Egg Yolk-Free Vegan Mayonnaise Preparation from Pickering Emulsion Stabilized by Gum Nanoparticles with or without Loading Olive Pomace Extracts. *ACS Omega*, 7(30), 26316-26327. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02149>.
42. Kargar, M., Fayazmanesh, K., Alavi, M., Spyropoulos, F., Norton, I.T. (2012). Investigation into the potential ability of Pickering emulsions (food-grade particles) to enhance the oxidative stability of oil-in-water emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 366(1), 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.09.073>.

References

1. Maionezy ta maionezni sousy. Zahalni tekhnichni umovy [Mayonnaise and mayonnaise sauces. General technical conditions]. (2016). *DSTU 4487:2015 from January 1, 2016*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy.
2. Filinska, T., & Filinska, A. (2024). Retsepturni innovatsii yak skladovi transformatsii rynku maioneznoi produktsii [Recipe innovations as ingredient transformations of the mayonnaise market]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technology*, 1(35), 212–224. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-212-224](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-212-224)
3. Aganovic, K., Bindrich, U., Heinz, V. (2018). Ultra-high pressure homogenisation process for production of reduced fat mayonnaise with similar rheological characteristics as its full fat counterpart. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 45, 208-214. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.10.013>.
4. Kerkhofs, S., Lipkens, H., Velghe, F., Verlooy, P., Martens, J.A. (2011). Mayonnaise production in batch and continuous process exploiting magnetohydrodynamic force. *Journal of Food Engineering*, 106(1), 35-39. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.04.003>.
5. Akhtar, M., Murray, B. S., Dowu S. (2014). A novel continuous process for making mayonnaise and salad cream using the spinning disc reactor: Effect of heat treatment. *Food Hydrocolloids*, 42(1), 223-228. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.06.007>.
6. Ozcan, I., Ozyigit, E., Erkok, S., Tavman, S., Kumcuoglu, S. (2023). Investigating the physical and quality characteristics and rheology of mayonnaise containing aquafaba as an egg substitute. *Journal of Food Engineering*, 344, 111388. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111388>.
7. He, Y., Purdy, S. K., Tse, T. J., Tar'an, B., Meda, V., Reaney, M. J. T., Mustafa, R. (2021). Standardization of Aquafaba Production and Application in Vegan Mayonnaise Analogs. *Foods*, 10(9), 1978. <https://doi.org/10.3390/foods10091978>.

8. Menezes, R., Carvalho Gomes, Q., Almeida, B., Matos, M., Pinto, L. (2022). Plant-based mayonnaise: Trending ingredients for innovative products. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 30, 100599. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100599>
9. He, Y., Meda, V., Reaney, M. J. T., Mustafa, R. (2021). Aquafaba, a new plant-based rheological additive for food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 27-42. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.035>.
10. Lafarga, T., Villaró, S., Bobo, G., Aguiló-Aguayo, I. (2019). Optimisation of the pH and boiling conditions needed to obtain improved foaming and emulsifying properties of chickpea *aquafaba* using a response surface methodology. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 18, 100177. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2019.100177>.
11. Gkinali, A., Matsakidou, A., Moschakis, T., Paraskevopoulou, A. (2024). Egg-free mayonnaise-type emulsions stabilized with proteins derived from the larvae of *Tenebrio molitor*. *Food Hydrocolloids*, 156, 110249. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110249>.
12. Deng, L. (2021). Current Progress in the Utilization of Soy-Based Emulsifiers in Food Applications – A Review. *Foods*, 10(6), 1354. <https://doi.org/10.3390/foods10061354>
13. Tang, C.-H. (2017). Emulsifying properties of soy proteins: A critical review with emphasis on the role of conformational flexibility. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr*, 57, 2636–2679. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1067594>
14. Heikal, Y., Hassan, A., Abou-Arab, A., Abu-Salem, F., Azab, D. (2023). Nano formulated soy proteins as a fat replacer in low fat mayonnaise formula. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 22(7), 469-479. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2023.04.006>
15. Chen, L., Chen, J., Ren, J., Zhao, M. (2011). Modifications of soy protein isolates using combined extrusion pre-treatment and controlled enzymatic hydrolysis for improved emulsifying properties. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 887-897. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.08.013>
16. Burger, T. G., Zhang, Y. (2019). Recent progress in the utilization of pea protein as an emulsifier for food applications. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.007>
17. Prabsangob, N., Udomrati, S. (2024). Acid-modified pea protein isolate and okara cellulose crystal: A co-emulsifier to improve physico-chemical stability of fat-reduced eggless mayonnaise. *Future Foods*, 9, 100298. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100298>
18. Armaforte, E., Hopper, L., Stevenson, G. (2021). Preliminary investigation on the effect of proteins of different leguminous species (*Cicer arietinum*, *Vicia faba* and *Lens culinaris*) on the texture and sensory properties of egg-free mayonnaise. *LWT*, 136(2), 110341. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110341>.
19. Ouraji, M., Alimi, M., Motamedzadegan, A., Shokoohi, S. (2020). Faba bean protein in reduced fat/cholesterol mayonnaise: extraction and physico-chemical modification process. *J Food Sci Technol*, 57(5), 1774-1785. doi: 10.1007/s13197-019-04211-9.
20. Mirsadeghi Darabi, D., Ariaei, P., Safari, R., Ahmadi, M. (2022). Effect of clover sprouts protein hydrolysates as an egg substitute on physicochemical and sensory properties of mayonnaise. *Food Science & Nutrition*, 10(1), 253-263. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2665>.
21. Rahbari, M., Aalami, M., Kashaninejad, M., Maghsoudlou, Y., Aghdaei, S.S. (2015). A mixture design approach to optimizing low cholesterol mayonnaise formulation prepared with wheat germ protein isolate. *J Food Sci Technol*, 52(6), 3383-3393. doi: 10.1007/s13197-014-1389-4.
22. Felix da Silva, D., Bettera, L., Ipsen, R., Hougaard, A. B. (2021). Cheese powders as emulsifier in mayonnaise. *LWT*, 151, 112188. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112188>.
23. Yazdanfar, N., Manafi, L., Ebrahiminejad, B., Mazaheri, Ye., Sadighara, P., Basaran, B., Mohamadi, S. (2023). Evaluation of Sodium Benzoate and Potassium Sorbate Preservative Concentrations in Different Sauce Samples in Urmia, Iran. *Journal of Food Protection*, 86(8), 100118. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2023.100118>.
24. Gomes, I. A., dos Santos Gomes, F., Freitas-Silva, O., Passos Lima da Silva, J. (2017). Ingredients of mayonnaise: Future perspectives focusing on essential oils to reduce oxidation and microbial counts. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 67(3). <https://www.alanrevista.org/ediciones/2017/3/art-4/>
25. Filinska, T.H., Filinska, A.O. (2025). *Maionezna produktsiia. Retsepturni innovatsii [Mayonnaise products. Recipe innovations]*. Ukr. derzh. un-t nauky i tekhnolohii NNI UDKhTU.

26. Winuprasith, T., Supphantharika, M. (2015). Properties and stability of oil-in-water emulsions stabilized by microfibrillated cellulose from mangosteen rind. *Food Hydrocolloids*, 43, 690-699. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.07.027>.
27. Jafari, S.M., Doost, A.S., Nasrabadi, M.N., Boostani, S., der Meeren, P.V. (2020). Phytoparticles for the stabilization of Pickering emulsions in the formulation of novel food colloidal dispersions. *Trends in Food Science & Technology*, 98, 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.008>.
28. Matos, M., Marefati, A., Barrero, P., Rayner, M., Gutiérrez, G. (2021). Resveratrol loaded Pickering emulsions stabilized by OSA modified rice starch granules. *Food Research International*, 139, 109837. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109837>.
29. Ye, F., Miao, M., Jiang, B., Campanella, O.H., Jin, Z., Zhang, T. (2017). Elucidation of stabilizing oil-in-water Pickering emulsion with different modified maize starch-based nanoparticles. *Food Chemistry*, 229, 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.062>.
30. Li, S., Zhang, B., Li, C., Fu, X., Huang, Q. (2020). Pickering emulsion gel stabilized by octenylsuccinate quinoa starch granule as lutein carrier: Role of the gel network. *Food Chemistry*, 305, 125476. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125476>.
31. Marefati, A., Wiege, B., Haase, N.U., Matos, M., Rayner, M. (2017). Pickering emulsifiers based on hydrophobically modified small granular starches – Part I: Manufacturing and physico-chemical characterization. *Carbohydrate Polymers*, 175, 473-483. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.07.044>.
32. Jia, Y., Kong, L., Zhang, B., Fu, X., Huang, Q. (2022). Fabrication and characterization of Pickering high internal phase emulsions stabilized by debranched starch-capric acid complex nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 207, 791-800. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.03.142>.
33. Leal-Castañeda, E.J., et al. (2018). Pickering emulsions stabilized with native and lauroylated amaranth starch. *Food Hydrocolloids*, 80, 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.043>.
34. Wang, W., Du, G., Li, C., Zhang, H., Long, Y., Ni, Y. (2016). Preparation of cellulose nanocrystals from asparagus (*Asparagus officinalis* L.) and their applications to palm oil/water Pickering emulsion. *Carbohydrate Polymers*, 151, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.052>.
35. Li, S., Jiao, B., Meng, S., Fu, W., Faisal, S., Li, X., Liu, H., Wang, Q. (2022). Edible mayonnaise-like Pickering emulsion stabilized by pea protein isolate microgels: Effect of food ingredients in commercial mayonnaise recipe. *Food Chemistry*, 376, 131866. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131866>.
36. Fazelioukouei, T., Tabibiazar, M., Mohammadifar, M., Masoumi, B., Homayouni-rad, A. (2023). Fabrication and characterization of food-grade pea protein-ascorbic acid nanoparticles-stabilized Pickering emulsion. *Journal of Molecular Liquids*, 388, 122829. <https://doi.org/10.1016/j.j.mol-liq.2023.122829>.
37. Ghirro, L.C., et al. (2022). Pickering Emulsions Stabilized with Curcumin-Based Solid Dispersion Particles as Mayonnaise-like Food Sauce Alternatives. *Molecules*, 27(4), 1250. <https://doi.org/10.3390/molecules27041250>.
38. Ruan, Q., Yang, X., Zeng, L., Qi, J. (2019). Physical and tribological properties of high internal phase emulsions based on citrus fibers and corn peptides. *Food Hydrocolloids*, 95, 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.014>.
39. Lu, Z., Zhou, S., Ye, F., Zhou, G., Gao, R., Qin, D., Zhao, G. (2021). A novel cholesterol-free mayonnaise made from Pickering emulsion stabilized by apple pomace particles. *Food Chem.*, 353, 129418. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129418>.
40. Lu, Z., Ye, F., Zhou, G., Gao, R., Qin, D., Zhao, G. (2020). Micronized apple pomace as a novel emulsifier for food O/W Pickering emulsion. *Food Chem.*, 330, 127325. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127325>.
41. Akcicek, A., Karasu, S., Bozkurt, F., Kayacan, S. (2022). Egg Yolk-Free Vegan Mayonnaise Preparation from Pickering Emulsion Stabilized by Gum Nanoparticles with or without Loading Olive Pomace Extracts. *ACS Omega*, 7(30), 26316-26327. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02149>.
42. Kargar, M., Fayazmanesh, K., Alavi, M., Spyropoulos, F., Norton, I.T. (2012). Investigation into the potential ability of Pickering emulsions (food-grade particles) to enhance the oxidative stability of oil-in-water emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 366(1), 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.09.073>.

Отримано 13.01.2025

Tetiana Filinska¹, Antonina Filinska²¹PhD in Technical Sciences,Associate Professor of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products
Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)**E-mail:** filinskaya@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989>²senior lecturer of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products

Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)

E-mail: antoniyafilin@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>

PICKERING EMULSIONS. PROSPECTS OF USE IN MAYONNAISE PRODUCTION

Mayonnaise and mayonnaise sauces are food water-fat emulsions of the direct "oil-in-water" type. To create a stable structure in such an emulsion system, consisting of two immiscible liquids, emulsifiers are used - surface-active substances with an amphiphilic structure, which form a kind of barrier layer between water and droplets of the fat phase, preventing coalescence and stratification. The trend towards reducing the use of chemical ingredients in mayonnaise products that pose a potential risk to consumer health, replacing them with natural analogues and the growing demand for egg-free mayonnaise sauces require the integration of advanced technologies into mayonnaise production. The latter should contribute to the production of high quality and safe mayonnaise products characterised by physical and chemical stability.

The analysis of recent publications showed that the issue of creating stable mayonnaise products has received considerable attention. A large number of egg substitutes and egg products have been proposed in the formulation of mayonnaise sauces, and recipes with natural antioxidants have been developed. However, the production of innovative mayonnaise products is based on traditional processes to form stable emulsions using surfactants.

The study of the processes of manufacturing Pickering mayonnaise emulsions using solid emulsifiers is relevant; the study of the properties and methods of modifying emulsifiers, as well as the features of their use and safety of application in food production.

The material presented in the article is a review. They provide an analysis of current approaches to the production of new types of mayonnaise products, details on aspects of the formation of Pickering mayonnaise emulsions with emulsifiers of different types, as well as the properties, modification methods and conditions for their use. Pickering emulsifiers can be natural biopolymers: modified starch granules, microcrystalline cellulose, chitin nanocrystals, etc. In the production of Pickering mayonnaise emulsions, environmental friendliness and resource-saving technologies are implemented by using waste and by-products from the production of vegetable raw materials (apple, olive pomace, etc.). The latter contain beneficial nutrients, dietary fibre and antioxidants (polyphenols, flavonoids) which provide clear health benefits to consumers.

Keywords: mayonnaise products; recipe components; innovations; Pickering emulsions; modification; surfactants; functional additives.

Fig.: 2. References: 42.

**Наталія Павлівна Буяльська¹, Наталя Миколаївна Денисова²,
Антон Олегович Кузін³**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: buialska@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6800-5604>, ResearcherID: [HME-2652-2023](https://orcid.org/HME-2652-2023)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: 422786@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3522-4210>, ResearcherID: [G-6068-2016](https://orcid.org/G-6068-2016)

³студент кафедри харчових технологій та екології
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: kuzin15042006@gmail.com

ЗНИЖЕННЯ ВПЛИВУ ШКІДЛИВИХ АНТРОПОГЕННИХ ФАКТОРІВ НА ЛЮДИНУ ШЛЯХОМ РОЗРОБКИ РАЦІОНУ ХАРЧУВАННЯ В УМОВАХ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТУ ВІДХОДАМИ ВІЙНИ

У роботі проведено оцінювання забруднення земель на територіях, які зазнають забруднення внаслідок війни в Україні. Розроблено приклад денного збалансованого раціону харчування для населення, яке проживає на забруднених територіях. Він заснований на доступних і традиційних для населення продуктах харчування, що дозволяють не лише забезпечувати організм необхідними нутрієнтами, а і сприяти протидії токсичним речовинам шляхом зниження їх засвоєння та прискорення природного виведення. Запропоновані схеми приготування традиційних страв для підприємств громадського харчування, які можуть бути використані на територіях із забрудненими ґрунтами.

Ключові слова: збалансований раціон харчування; забруднення земель; профілактичне харчування; нутрієнти; населення України; війна в Україні.

Табл.: 2. Рис.: 6. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Сучасна Україна, в активній бойовій фазі, є достатньо напруженим регіоном Європи не тільки із соціально-економічної позиції, але й у контексті істотного порушення якісного та кількісного складу ґрунтового покриву.

Забруднення ґрунтів в Україні, що зумовлене військовими діями, через застосування зброї масового ураження, руйнувань будівель, споруд, інженерних комунікацій та об'єктів енергетики стає однією з найбільших екологічних проблем, що відчувається в усьому світі.

Згідно з оцінками Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, збитки від забруднення земельних ресурсів за період з початку 2022 року становить 27,9 млрд дол. (загальна шкода довкіллю 69,9 млрд дол. на 13.09.2024 р.), а забрудненими є 20,8 млн м² ґрунтів внаслідок бойових дій [1]. Експерти відзначають, що відбуваються незворотні втрати ресурсів біорізноманіття, знищення природного середовища, а також виявляється значна небезпека існуванню рідкісних видів рослин і тварин. Такі катастрофічні наслідки виникають не тільки через безпосереднє руйнування оселищ живих організмів, а й у довгостроковій екологічній перспективі.

Результати експертного оцінювання еколого-геохімічного стану території України внаслідок воєнно-техногенного навантаження [2] доводять, що вплив різних видів озброєння і військової техніки на ґрунтовий покрив значний та може бути оцінений за такими групами: механічне забруднення (гільзи, снаряди, осколки, кулі, осколки куль, пакувальні матеріали з-під боєприпасів, промаслене сміття, ерозія ґрунту від вибуху, ерозія ґрунту від сховищ, ерозія ґрунту від руху техніки, ущільнення ґрунту); фізичне забруднення (теплове згоряння порохового заряду, згоряння розривної речовини, робота двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), акустичне згоряння порохового заряду, згоряння розривної речовини, робота ДВЗ, вібраційне згоряння порохового заряду, згоряння розривної речовини, робота ДВЗ, світлове згоряння порохового заряду, згоряння розривної речовини); хімічне забруднення (порохові гази від згоряння порохового заряду та розривної речовини, частки, які не згоріли від порохового заряду та розривної речовини, мастильні матеріали, вихлопні гази ДВЗ, забруднення води та ґрунту нафтопродуктами, важкі метали та ін.).

У дослідженнях [1] відзначається також, що, крім важких металів, у ґрунті накопичується значна кількість алюмінію, міді, сірки та азоту, які знищують біорізноманіття покривного шару ґрунту, а також змінюють його фізико-хімічні показники.

Небезпечні речовини потрапляють через ґрунт у воду та рослини, що на ньому вирощуються, а потім до організму тварин та людей, що їх вживають. Значна кількість досліджень [2; 3] підтверджують наведену схему міграції токсичних речовин від ґрунту до рослин та людини.

У [2] відзначено, що в ґрунтовому розчині можуть перебувати в іонній та зв'язаній формах сполуки колоїдної групи важких металів, що фіксуються та закріплюються за всією товщею ґрунту, які є наслідком використання зброї масового ураження. Важкі метали (Свинець, Ртуть, Миш'як, Кадмій, Цинк, Мідь), крім безпосереднього надходження через продукти харчування з ґрунту, води або повітря, також надходять з пестицидів або інших добрив. Надмірна кількість важких металів, що потрапили до харчових продуктів викликає отруєння, алергічні реакції, порушення функцій внутрішніх органів, онкологічні та інші захворювання.

Однак разом з підвищенням рівня забрудненості ґрунтів, фіксується адаптивність аграрної галузі України, збільшення врожайності зернових, зернобобових, олійних культур [4], збільшуються обсяги овочевої та плодово-ягідної продукції, стабілізується м'ясо-молочна галузь.

Тому надзвичайно актуальною є проблема забруднення харчових продуктів, що вирощуються та переробляються на територіях, де відбувається бойова активність, та на територіях, що забруднені внаслідок контакту з поверхневими та ґрунтовими водами, а також забрудненими атмосферними опадами.

Одним із напрямів для підтримки здоров'я населення, яке проживає на забруднених територіях, є збалансоване харчування, яке забезпечує організм необхідними нутрієнтами та знижує ризик засвоєння шкідливих речовин, накопичених рослинами або тваринами під час їхнього перебування на забруднених територіях. У зв'язку з цим розробка збалансованих раціонів харчування для населення, яке проживає на територіях, забруднених унаслідок війни в Україні, є актуальним завданням, рішення якого не може відкладатися.

Постановка проблеми. Населення, яке проживає на території, забрудненій важкими металами, нафтопродуктами та іншими контамінантами, що потрапляють до ґрунту внаслідок війни в Україні, може зіткнутися зі збільшенням частоти низки гострих та хронічних захворювань. Зменшити ризик захворюваності можна лише за рахунок комплексних заходів, одним із яких є підбір збалансованого раціону харчування. Для широкого застосування такого раціону продукти харчування в його складі повинні бути доступними, а страви – традиційними.

Розробка збалансованих раціонів харчування відповідає Концепції покращення продовольчого забезпечення та якості харчування населення. Згідно з нею, до основних напрямів державної політики в Україні належать рішення щодо «виробництва продуктів з високою харчовою та біологічною цінністю, що збагачені макро- та мікронутрієнтами, а також створення спеціальних харчових продуктів з цілеспрямованим зміненим хімічним складом (для профілактики захворювань і підвищення стійкості організму до негативного впливу довкілля з різними видами забруднювачів)» [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ініціативам щодо моніторингу здорового харчування [6] на світовому рівні присвячена значна кількість проєктів від Продовольчої та Сільськогосподарської організації Об'єднаних націй (ФАО), ЮНІСЕФ та ВООЗ. Сучасна місія державних управлінських органів, фахівців харчової галузі, спеціалістів з охорони здоров'я та інших заінтересованих осіб, які визначають ці світові організації, полягає у формуванні здорових раціонів харчування в інтересах людства та планети загалом.

Більша частина сучасних досліджень раціонів харчування направлена на створення рішень, що пов'язані зі зниженням ваги людини та її підтримання, в контексті «здорового харчування», а також дієт післялікарняного відновлення. Дослідження саме цього профілю формує специфічне коло дієт, що будується переважно на розрахунку енергетичної ефективності продуктів харчування та їх поєднання в прийомах їжі.

Наприклад, у [7] система харчування представлена у вигляді «піраміди харчування», що містить обмеження споживання по трьох групах продуктів. На першому рівні - овочі та фрукти, цільнозернові харчові продукти (неочищений рис, хліб та макаронні вироби з борошна твердих сортів, каші) та рослинні жири (соняшникова, оливкова, рапсова олії та ін.), які містять поліненасичені жирні кислоти. На другому поверху піраміди розташувалися білки рослинного (горіхи, бобові, насіння) та тваринного (риба і морепродукти, м'ясо птиці та яйця) походження, а також молоко та молочні продукти (йогурти, сир тощо). На третьому рівні піраміди знаходяться продукти, вживання яких слід скоротити. Це тваринні жири, що містяться в червоних сортах м'яса (свинині, яловичині) і вершковому маслі, а також продукти з великим вмістом так званих «швидких вуглеводів» (хліб і хлібобулочні вироби, макаронні вироби, очищений рис, газовані напої та інші солодоші).

Інша частина досліджень стосується розроблення раціонів харчування для працівників підприємств зі шкідливими та небезпечними умовами праці. Здебільшого це роботи вітчизняних науковців, оскільки система пільг та компенсацій за роботу в таких умовах потребує від роботодавців України безкоштовного надання працівникам лікувально-профілактичного харчування та молока. Наприклад, у [8] наведено існуючі раціони лікувально-профілактичного харчування, що враховують надходження шкідливих хімічних речовин на робочих місцях, з урахуванням метаболізму цих сполук в організмі, а також впливу компонентів харчових продуктів раціону, що надає деякий захисний ефект для попередження розвитку професійних захворювань та отруєнь.

У роботі [9] з метою запобігання порушень в обміні речовин та підвищення стійкості організму для деяких видів робіт зазначається, що:

- під час роботи з радіонуклідами та джерелами іонізуючого випромінювання раціон харчування працівників повинен бути збагачений ліпотропними речовинами, що надають антитоксичну функцію для печінки;
- на виробництвах сірчаної та азотної кислот, сполук хлору та фтору, ціанідів, лужних металів раціон харчування повинен включати повноцінні білки, поліненасичені жирні кислоти, що запобігають накопиченню токсичних сполук в організмі;
- на виробництвах з присутністю хрому та його сполук раціон збагачують амінокислотами та вітамінними комплексами;
- наявність у повітрі неорганічних та органічних сполук свинцю веде до поповнення раціону харчування білковими продуктами, лужних елементів, пектину, вітамінів;
- на робочих місцях, з надлишковим виділенням аміно- та нітросполук, бензолу та його гомологів, хлоровуглеводнів, сполук миш'яку та ртуті, ртутних приладів, телуру, фосфору, іонообмінних смол, склопластиків раціон харчування повинен включати ліпотропні речовини та вітаміни, а також дещо обмежують продукти, що обтяжують функцію печінки (смажені, солоні продукти) та ін.

Дослідження щодо розрахунку та підбору раціонів харчування населення, що проживає на забруднених територіях та споживає місцеву їжу дещо обмежені. У роботі [10], що стосуються розробки комплексів зернових сумішей та концентратів з порошку овочів, зародків пшениці, сухофруктів, полівітамінного комплексу та йоду, доведена ефективність для оптимізації структури системи харчування українців.

Польськими дослідниками показано, що частка різних шляхів впливу в загальному ризику для здоров'я зменшувалася в наступному порядку: споживання забруднених овочів > випадкове проковтування ґрунту > шкірний контакт > вдихання забруднених частинок ґрунту, причому діти більш схильні до токсичного впливу потенційно токсичних елементів [11].

Дослідження, проведені різними дослідницькими групами, показують, що збалансований раціон є одним із важливих факторів, що сприяє зниженню негативного впливу на організм важких металів. Найбільш показовими є роботи, присвячені вивченню впливу важких металів на організм під час внутрішньоутробного розвитку, тобто в період максимального сприйняття дії всіх екологічних факторів.

Останні роботи японських дослідників показали, що добре збалансоване харчування ще до періоду вагітності може знизити вплив деяких важких металів, зокрема Плюмбума, і пом'якшити підвищений ризик зниженої ваги дитини під час потрапляння в організм матері цих токсичних компонентів [12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Розробка раціонів харчування для населення, яке проживає на територіях зі складним характером забруднення ґрунтів, що формується через війну в Україні, є новим та дуже актуальним напрямом досліджень. Вона передбачає використання традиційних для країни страв, поєднання яких забезпечує оптимальний баланс необхідних компонентів їжі та знижує ризик негативного впливу токсичних сполук на організм людини. Дослідження в галузі забезпечення населення, що проживає в зоні ведення бойових дій, збалансованим раціоном харчування є недослідженою частиною загальної проблеми збереження здоров'я людей за рахунок якісних продуктів харчування та збалансованого поєднання їх у харчовому раціоні.

Мета роботи. Розробка оптимального раціону харчування з традиційних страв для населення України, що дозволяє запобігти небезпечному токсичному впливу забруднювачів, що потрапляють через вживання води та продуктів харчування, які вироблені на територіях, де проходять бойові дії.

Виклад основного матеріалу. Для розрахунку оптимального раціону використовують методики та схеми, що базуються на добових нормах споживання. Калорійність раціону харчування повинна відповідати рівню енергетичних витрат організму людини. Оптимальне співвідношення білків, жирів і вуглеводів (за масою) в добовому раціоні повинно відповідати такому співвідношенню 1:1:4.

Рекомендований нормативним документом [13] вміст у раціоні білків тваринного походження проти загальної вазі білків: для дітей – 60 % і більше, для дорослих – 50 % і більше, а вміст білків відносно енергетичної цінності для дітей – близько 15 % калорійності, для дорослих – близько 13 % калорійності; вміст жирів – близько 30 % калорійності. Вміст жирів рослинного походження в раціоні харчування повинен складати близько 20 % від загальної кількості жирів (поліненасичених та мононенасичених жирних кислот 10 % на 10 % калорійності добового раціону відповідно). Розрахунок харчової цінності середньодобових раціонів може відрізнятися від добових норм: для білка – 11 %, жиру – 12 %, вуглеводів – 10 %.

До основних вимог, що стосуються формування оптимального раціону харчування, належать – збалансованість за видами основних поживних речовин (білки, жири, вуглеводи, вітаміни, мікроелементи) та раціональність кількісного споживання за прийомами їжі (сніданок: 25–30 % добової калорійності, полуденок: 10–15 %, обід: 35–40 %, полуденок: 10–15 %, вечеря: 15–20 %) [13].

Приклади застосування харчових продуктів у раціоні [14]:

1. Білки (20–25 %) – м'ясо (курятина, індичка, кролик, нежирна яловичина), риба (з перевічених джерел, наприклад, хек, судак), яйця (бажано органічні), молочні продукти (йогурт, сир, кефір), рослинні білки (сочевиця, нут, квасоля).

2. Вуглеводи (45–55 %) – цільнозернові крупи (гречка, рис, кіноа, кус-кус), овочі (особливо термічно оброблені: броколі, морква, кабачки, гарбуз), фрукти (яблука, банани, груші, цитрусові), цільнозерновий хліб і хлібці.

3. Жири (20–25 %) – рослинні олії (оливкова, лляна), авокадо, горіхи та насіння, морська риба (у помірних кількостях).

4. Вітаміни та мікроелементи – зелені листові овочі (шпинат, кріп), морські водорості (ламінарія), продукти, багаті на антиоксиданти (ягоди, бурак, горіхи).

Для нашої держави традиційними є страви, що тією чи іншою мірою складаються з традиційних продуктів, вирощених на території України – борщ, бограч, куліш, молочні каші, млинці, сирники, вареники тощо [15]. В умовах воєнного стану важливим є наявність в раціоні різноманітних білкових продуктів. Доцільно замінити червоне м'ясо (яловичину, свинину, баранину тощо) м'ясом птиці та рибою. Частину тваринного білка можна замінити рослинним білком.

У зв'язку з тим, що багато забруднюючих речовин накопичується в жирових тканинах нами рекомендується раціон з достатнім вмістом загального жиру, але низьким вмістом тваринних жирів. Необхідним у таких умовах є споживання молочних продуктів. У зв'язку з цим ми рекомендуємо збільшити у своєму раціоні кількість нежирних молочних продуктів, таких як кефір, йогурт, сир тощо. Для населення, що проживає на забруднених територіях, важливим є споживання продуктів із високим вмістом калію, харчових волокон, кальцію та вітаміну D. До таких продуктів належать овочі, фрукти, цільнозернові продукти, риба, молочні продукти.

Врахування наведених вимог, рекомендацій для харчування в умовах воєнного стану та традиційного вибору населення щодо страв харчування дозволяє сформувати приклад оптимального раціону (табл. 1). Хімічний склад продуктів та страв наведено відповідно до [16].

Наведений оптимальний раціон дозволяє забезпечити організм людини поживними речовинами та надати можливості виведення токсичних речовин з організму.

Для порівняння на рис. 1 наведені фізіологічні норми потреб населення України в основних харчових речовинах і енергії (для дорослого населення, віком 18–29 років, II групи за коефіцієнтом фізичної активності (легка фізична активність) [14].

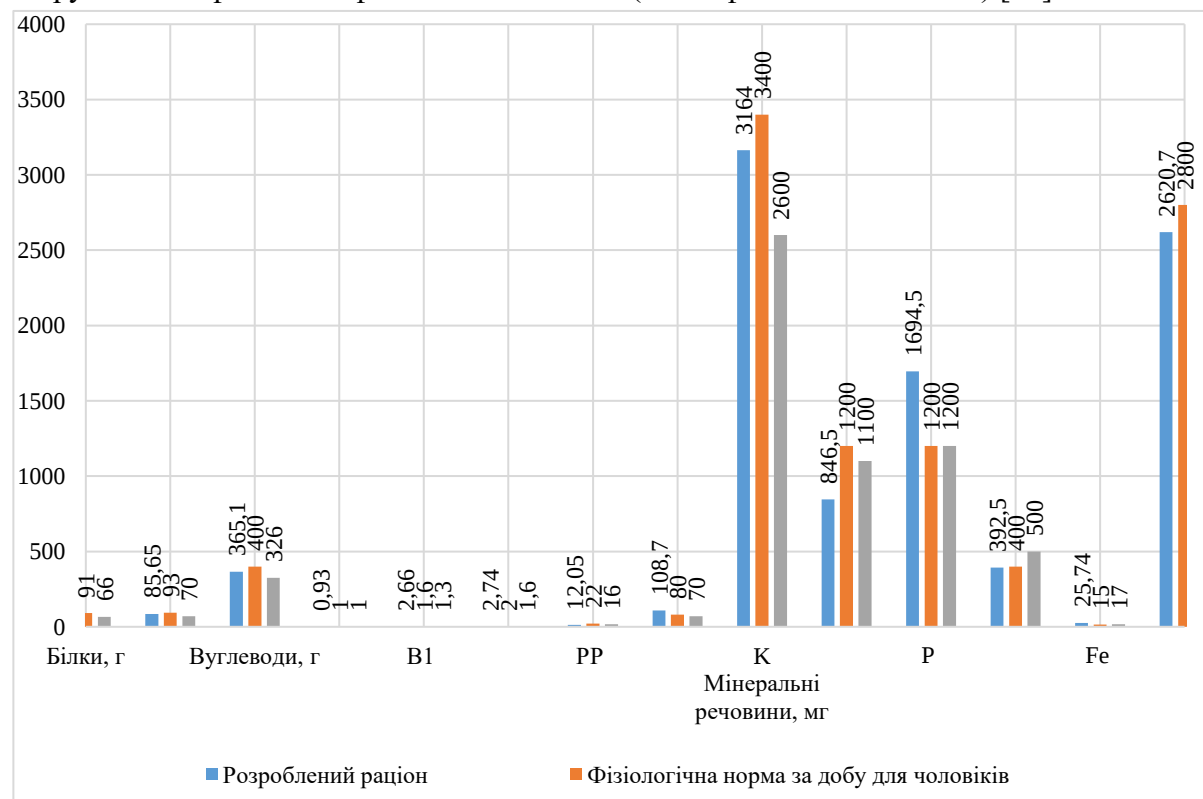


Рис. 1. Порівняння надходження поживних, мінеральних речовин та вітамінів в розробленому раціоні та фізіологічних нормативів для жінок та чоловіків в Україні [14]

Таблиця 1 – Приклад розрахованого оптимального раціону харчування для населення на забруднених територіях унаслідок бойових дій

Назва страви (продукту)	Кількість, г	Білки, г	Жири, г	Вуглеводи, г	Вітаміни, мг						Мінеральні речовини, мг					Енергетич-ність, ккал
					A	β-каротин	B1	B2	PP	C	K	Ca	P	Mg	Fe	
Сніданок																
Каша гречана розсипчаста	200,00	11,80	3,20	62,00	–	–	0,28	0,16	3,42	–	203,00	62,00	280,00	76,00	6,40	326,00
Омлет	100,00	9,60	15,40	1,90	–	0,07	0,05	0,36	0,15	–	143,00	78,00	182,00	13,00	1,90	184,00
Чай з цукром	200,00	зл.	0,00	8,00	–	зл.	зл.	зл.	0,06	зл.	6,00	зл.	зл.	зл.	0,20	62,00
Другий сніданок																
Сир жирний з сметаною	100,00	12,50	18,30	2,90	–	0,05	0,05	0,27	0,27	0,50	112,00	142,00	192,00	20,00	–	229,00
Яблука	50,00	0,20	0,20	5,50	–	0,03	0,03	0,01	0,15	83,00	139,00	8,00	5,50	4,50	1,10	22,50
Обід																
Борщ з капустою і картоплею	500,00	4,50	10,50	28,00	–	1,05	0,10	0,10	1,45	14,00	865,00	85,00	195,00	60,00	2,50	215,00
Хліб Бородинський (заварний)	100,00	6,80	1,30	41,80	–	–	0,18	0,08	1,00	–	235,00	47,00	157,00	49,00	3,90	207,00
Картопляне пюре	100,00	2,20	0,80	15,40	–	–	0,90	0,70	0,92	3,60	444,00	28,00	55,00	20,00	0,70	74,00
Печінка тушкована	50,00	5,50	4,80	4,20	0,28	2,11	0,80	0,57	2,50	5,00	87,00	27,00	93,50	7,00	2,00	82,50
Компот з сушених яблук	200,00	0,48	–	30,40	–	зл.	зл.	зл.	0,10	зл.	86,00	18,00	12,00	10,00	2,20	116,00
Печиво цукрове	100,00	7,50	11,80	77,40	–	–	0,08	0,05	0,07	0,00	110,00	29,00	90,00	20,00	2,10	436,00
Полуденок																
Йогурт	200,00	10,00	3,00	9,60	0,02	–	0,06	0,30	0,30	1,20	304,00	248,00	190,00	30,00	0,20	102,00
Вечеря																
Каша рисова розсипчаста	200,00	5,00	0,40	53,00	–		0,04	0,02	0,98	–	38,00	30,00	68,00	20,00	0,80	240,00
Батон нарізний	50,00	4,00	0,45	25,00			0,80	0,03	0,82	–	68,00	11,50	44,50	17,00	1,00	117,50
Масло селянське (82,5 % жирно-сті)	20,00	0,16	14,50	0,27	0,08	0,06	–	0,02	0,01	0,00	6,00	5,00	6,00	0,1	0,04	132,20
Минтай тушений	100,00	16,50	1,00	–	–	–	0,09	0,09	0,97	1,40	318,00	28,00	124,00	46,00	0,90	75,00
Разом за добу	–	96,58	85,65	365,10	0,38	3,37	2,66	2,74	12,05	108,70	3164,00	846,50	1694,50	392,50	25,74	2620,70

Джерело: [16].

Запропонований раціон можна рекомендувати для закладів громадського харчування.

Слід зазначити, що великий потенціал для розробки раціонів харчування за заданими і змінними параметрами мають сучасні смарттехнології. Їхній розвиток у містах України, зокрема в Чернігові, дозволить проводити найбільш ефективний розрахунок необхідних компонентів раціону харчування залежно від району вирощування сировини, маси продукту, вікової групи людей та інших значущих показників. У зв'язку з цим у Національному університеті «Чернігівська політехніка» в межах проєкту UniCities програми Erasmus+ проводяться дослідження в цьому актуальному для країни напрямку.

Нами були розроблені блок-схеми виготовлення страв для підприємств громадського харчування на основі підібраного оптимального раціону (рис. 2–5).

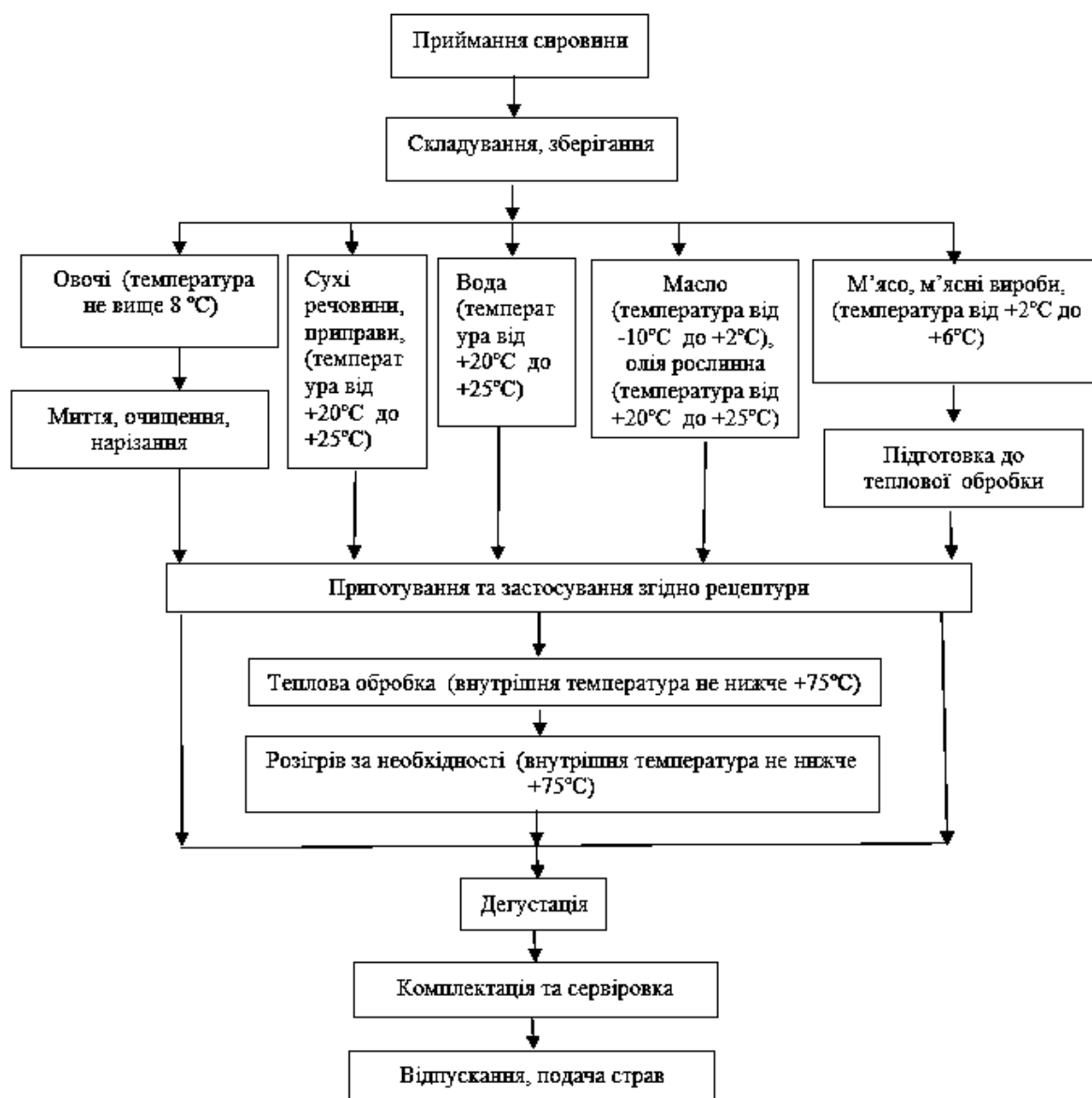


Рис. 2. Блок-схеми приготування традиційних перших страв для підприємств громадського харчування

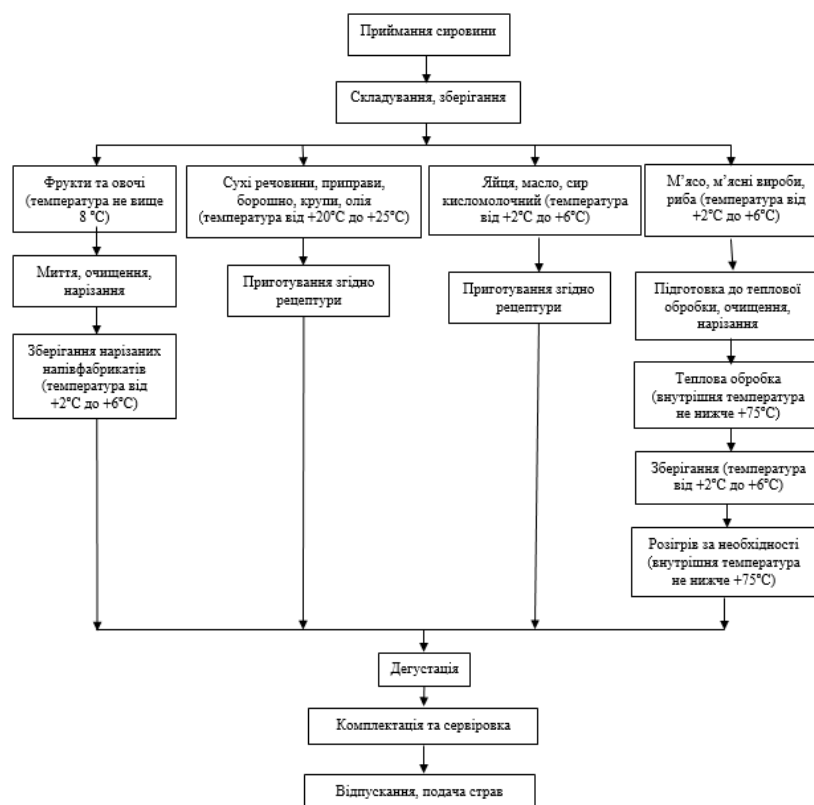


Рис. 3. Блок-схеми приготування традиційних других страв для підприємств громадського харчування

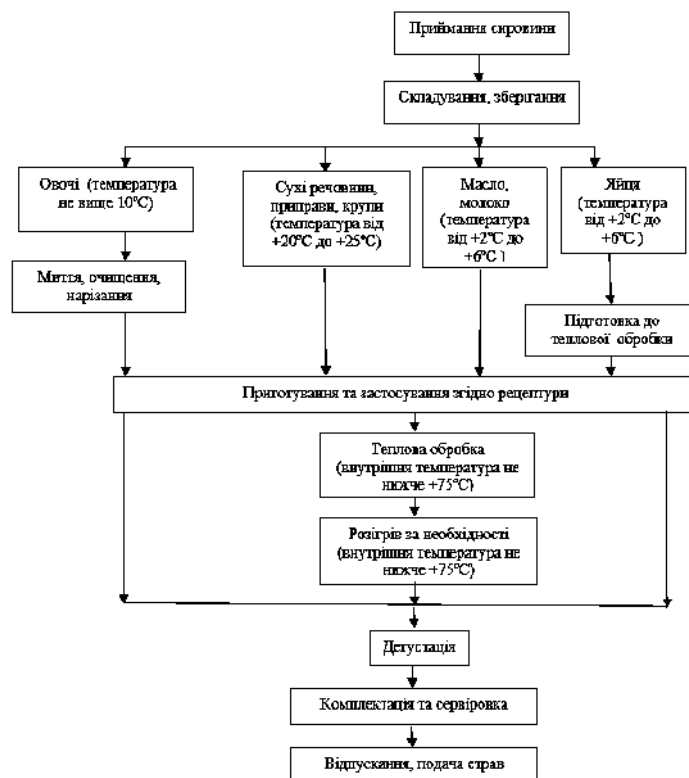


Рис. 4. Блок-схеми приготування традиційних гарнірів для підприємств громадського харчування



Рис. 5. Блок-схеми приготування традиційних напоїв для підприємств громадського харчування

Запропоновані блок-схеми можуть бути використані в закладах громадського харчування при впровадженні системи НАССР.

Висновки. Запропонований збалансований раціон харчування, що дозволяє забезпечити організм людини поживними речовинами, мінеральними елементами, вітамінами та харчовими волокнами та надати можливості виведення токсичних речовин з організму в умовах проживання на територіях, забруднених внаслідок ведення воєнних дій.

Розроблені блок-схеми виготовлення страв для підприємств громадського харчування, які можуть бути використані при впровадженні системи НАССР.

Робота виконана в межах міжнародного проєкту Erasmus+ UniCities (Unlocking the Transformative potential of Ukrainian Universities towards climate neutral and sustainable cities).

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів.

Під час написання цього матеріалу автори не використовували ШІ технології для написання представленого тексту. Автори беруть на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. *Top lead projects.* (б.д.). Російсько-Українська війна: вплив на довкілля. Друге видання. <https://www.topleadprojects.com/ukrainian-war-in-ua-environment-2024>.

2. Сплодитель, А., Голубцов, О., Чумаченко, С., Сорокіна, Л. (б.д.). Забруднення земель внаслідок агресії Росії проти України. <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii1.pdf>.
3. Вовк, К. (30.06.2023). Як війна впливає на родючість ґрунтів та якість їжі? <https://svidomi.in.ua/page/yak-viina-vplyvaie-na-rodichist-gruntiv-ta-iakist-izhi>.
4. Русан В. М., Жураковська Л. А. (14.02.2024). Аграрний сектор України у 2023 році: складові стійкості, проблеми та перспективні завдання. *Звіт Національного інституту стратегічних досліджень*. <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/ekonomika/ahraryny-sektor-ukrayiny-u-2023-rotsi-skladovi-stiykosti-problemy-ta>.
5. Концепція поліпшення продовольчого забезпечення та якості харчування населення : затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 26 травня 2004 р. № 332-р. <https://www.kmu.gov.ua/npas/6595467>.
6. Guidance for monitoring healthy diets globally. (21 June 2024). *World Health Organization (WHO)*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240094383>.
7. Піраміда здорового харчування: основні правила гарвардської тарілки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://apollo.online/blog-post/harvard-plate-healthy-eating>.
8. Денисова, Н. М., Буяльська, Н. П. (2024). До проблеми формування раціону лікувально-профілактичного харчування працівників зі шкідливими та небезпечними умовами. *Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки* : збірник матеріалів XXXI Всеукраїнської науково-методичної конференції (з участю студентів) (рр. 65-70). КПП ім. Ігоря Сікорського.
9. Лікувально-профілактичне харчування для робітників, зайнятих на роботах із шкідливими умовами праці (24.09.2018). Охорона праці і пожежна безпека. <https://oppb.com.ua/news/likuvalno-profilaktychne-harchuvannya-dlya-robotnykiv-zaynyatyh-na-robotah-iz-shkidlyvymy>.
10. Bal-Prylpyko, L., Tolok, H., Nikolaenko, M. S., Antonenko, A., Brovenko, T. (2021). New grain concentrates with increased biological value in the structure of modern nutrition. *Animal Science and Food Technology*, 12(2), 5-13. <https://doi.org/10.31548/animal2021.02.001>.
11. Kicińska, A., Wikar, J. (2024). Health risk associated with soil and plant contamination in industrial areas. *Plant Soil*, 498, 295-323. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06436-2>.
12. Okubo, H., Nakayama, S. F. (2023). Periconceptional maternal diet quality influences blood heavy metal concentrations and their effect on low birth weight: The Japan Environment and Children's Study. *Environment International*, 173, 107808. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107808>.
13. Про затвердження Норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах і енергії. (03.09.2017). *Офіційний вебпортал парламенту України*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1206-17#n14>.
14. Vaclavik, V. A., Christian, E. W., Campbell, T. (2021). *Essentials of Food Science*. Fifth Edition. Springer.
15. Кручаниця, М.І., Миронюк, І.С., Розумикова, Н.В., Кручаниця, В.В., Брич, В.В., Кіш, В.П. (2019). *Основи харчування : підручник*. Вид-во УжНУ «Говерла».
16. Зубар, Н. М. (2018). *Основи фізіології та гігієни харчування*. Кондор.

References

1. Rosiisko-Ukrainska viina: vplyv na dovkillia. Druhe vydannia [The Russian-Ukrainian war: environmental impact. Second edition]. (2024). <https://www.topleadprojects.com/ukrainian-war-in-ua-environment-2024>.
2. Splodytel, A., Holubtsov, O., Chumachenko, S., Sorokina, L. (n.d.). *Zabrudnennia zemel vnaslidok ahresii Rosii proty Ukrainy [Land pollution as a result of Russia's aggression against Ukraine]*. <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii1.pdf>.
3. Vovk, K. (30.06.2023). *Yak viina vplyvaie na rodichist gruntiv ta yakist yizhi? [How does war affect soil fertility and food quality?]*. (2023). <https://svidomi.in.ua/page/yak-viina-vplyvaie-na-rodichist-gruntiv-ta-iakist-izhi>.

4. Rusan, V.M., Zhurakovska, L.A. (2024). *Ahrarnyi sektor Ukrainy u 2023 rotsi: skladovi stiikosti, problemy ta perspektyvni zavdannia. Zvit Natsionalnoho instytutu stratehichnykh doslidzhen [The agricultural sector of Ukraine in 2023: components of sustainability, problems and promising tasks. Report of the National Institute for Strategic Studies]*. <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/ekonomika/ahrarnyy-sektor-ukrayiny-u-2023-rotsi-skladovi-stiikosti-problemy-ta>.
5. Kontseptsiiia polipshennia prodovolchoho zabezpechennia ta yakosti kharchuvannia naselennia [The concept of improving food security and nutrition quality of the population]. (2004). <https://www.kmu.gov.ua/npas/6595467>.
6. Guidance for monitoring healthy diets globally. (2024). <https://www.who.int/publications/i/item/9789240094383>.
7. Piramida zdorovoho kharchuvannia: osnovni pravyla harvardskoi tarilky [Healthy eating pyramid: the basic rules of the Harvard plate]. (2025). <https://apollo.online/blog-post/harvard-plate-healthy-eating/>.
8. Denysova, N. M., Buialska, N. P. (2024) Do problemy formuvannia ratsionu likuvalno-profilaktychnoho kharchuvannia pratsivnykiv zi shkidlyvymy ta nebezpechnymy umovamy pratsi [On the problem of forming a diet of therapeutic and prophylactic nutrition for workers with harmful and hazardous working conditions]. *Problemy okhorony pratsi, promyslovoi ta tsyvilnoi bezpeky – Problems of labor protection, industrial and civil safety: Proceedings of the XXXI All-Ukrainian scientific and methodological conference (with the participation of students)*. (pp. 65–70). National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.
9. Likuvalno-profilaktychne kharchuvannia dlia robitnykiv, zainiatykh na robotakh iz shkidlyvymy umovamy pratsi [Therapeutic and preventive nutrition for workers engaged in work with harmful working conditions]. (2018). <https://oppb.com.ua/news/likuvalno-profilaktychne-harchuvannya-dlya-robitnykiv-zaynyatyh-na-robotah-iz-shkidlyvymy>.
10. Bal-Prylypko, L., Tolok, H., Nikolaenko, M. S., Antonenko, A., Brovenko, T. (2021). New grain concentrates with increased biological value in the structure of modern nutrition. *Animal Science and Food Technology*, 12(2), 5–13. <https://doi.org/10.31548/animal2021.02.001>.
11. Kicińska, A., Wikar, J. (2024). Health risk associated with soil and plant contamination in industrial areas. *Plant Soil*, 498, 295–323. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06436-2>.
12. Okubo, H., Nakayama, S. F, the Japan Environment and Children’s Study Group (2023). Periconceptional maternal diet quality influences blood heavy metal concentrations and their effect on low birth weight: The Japan Environment and Children’s Study. *Environment International*, 173, 107808. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107808>.
13. Normy fiziologichnykh potreb naselennia Ukrainy v osnovnykh kharchovykh rehovynakh i enerhii [Norms of physiological needs of the population of Ukraine in basic nutrients and energy], Order of Ministry of Health of Ukraine No.1073 (September 3, 2017). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1206-17#n14>.
14. Vaclavik, V. A., Christian, E. W., Campbell, T. (2021). *Essentials of Food Science*. (Fifth Edition). Springer.
15. Kruchanytsia, M. I., Mironyuk, I. S., Rozumikova N. V., Kruchanytsia V. V., Brych, V. V., Kish, V.P. (2019). *Osnovy kharchuvannia [Basics of Nutrition]*. Publishing House of UzhNU “Hov-erla”.
16. Zubar, N. M. (2018). *Osnovy fiziologii ta hihiieny kharchuvannia [Basics of physiology and nutritional hygiene]*. Kondor.

Отримано 19.01.25

Nataliia Buialska¹, Natalya Denisova², Anton Kuzin³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Technology and Ecology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: buialska@gmail.com. **ORCID** <http://orcid.org/0000-0002-6800-5604>. **ResearcherID:** G-2935-2014

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Technology and Ecology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: 422786@gmail.com. **ORCID** <http://orcid.org/0000-0002-3522-4210>. **ResearcherID:** G-6068-2016

³Student of the Department of Food Technology and Ecology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: kuzin15042006@gmail.com

REDUCING THE INFLUENCE OF HARMFUL ANTHROPOGENIC FACTORS ON A HUMAN BY DEVELOPING A DIET IN THE CASE OF SOIL CONTAMINATED BY WAR WASTE

Developing balanced diets is an important step to maintain the health of people living in areas with soils contaminated by the war in Ukraine. Such diets should be used by catering establishments as well as private households, especially in rural areas.

When developing balanced diets for preventive purposes for people living in areas with contaminated soils, it is necessary to take into account not only the need to provide the human body with the necessary nutrients, but also the task of removing toxic compounds. Therefore, the development of such diets is a necessary element of food technology in Ukraine.

An analysis of research and publications has shown that, to date, issues related to the development of balanced diets for people living in areas contaminated by war waste have not been given any attention in the scientific literature.

The aim of the work is to develop a balanced diet of traditional dishes for the population of Ukraine, which will prevent the dangerous toxic effects of pollutants entering through the consumption of water and food products produced in areas where military actions are taking place.

Based on traditional dishes for the population of Ukraine and available food products, an example of a daily balanced diet for people living in areas contaminated by war waste (heavy metals, oil products, etc.) has been developed. It provides greater resistance of the human body to toxic compounds that can enter with food and drinking water obtained from contaminated soils. The proposed block diagrams can be used in catering establishments when introducing balanced diets for preventive purposes, as well as the HACCP system. Some recommendations for rational nutrition in wartime conditions taking into account food products from raw materials obtained from contaminated soils are given.

An example of a balanced diet for people living in areas contaminated by the war in Ukraine is calculated. The intake of nutrients and minerals in the developed diet is compared with physiological standards for men and women in Ukraine. Block diagrams for the preparation of traditional dishes for catering establishments are proposed.

Keywords: balanced diet; soil pollution; preventive nutrition; nutrients; population of Ukraine; war in Ukraine.

Fig.: 6. Table: 2. References: 16.

Zhanna Zamay¹, Andriy Ignatenko², Konstantin Ivanenko³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Technologies and Ecology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: zamaizhanna@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2879-4677>. Scopus ID: 6506101557; 6506148493

² master's degree

Chernihiv Polytechnic National University

E-mail: aign02@ukr.net

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Food Technologies and Ecology
National University "Chernihiv Polytechnic" (Chernihiv, Ukraine).

E-mail: saprl21@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9940-6523>. ScopusID: 57196196416

**PHYSICO-CHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL QUALITY INDICATORS OF
FERMENTED WALNUT MILK-BASED DRINK**

The article theoretically substantiates and proves the method of obtaining a fermented drink made from a mixture of nut and cow's milk. Psyllium was used as a consistency stabilizer and a component that enriches the product with dietary fiber. The optimal ratio of nut and cow's milk was determined as 60:40 volume percent, respectively, and the concentration of psyllium was 1.5%. A product with improved organoleptic properties and increased biological value was obtained. The physicochemical and microbiological indicators were analyzed and the nutritional value of the recommended drink was calculated. The developed fermented drink with the addition of plant raw materials (nut milk and psyllium) will contribute to expanding the range of products with a reduced lactose content.

Keywords: nut milk; fermented drink; psyllium; plant-based raw materials; physicochemical indicators; nutritional value.

Table: 5. Fig.: 3. References: 22.

Urgency of the research. Current trends in food consumption show an increase in consumer demand for ecological and functional products. The number of followers of vegetarian nutrition, which includes the use of alternative sources of nutrients, is also growing. Fermented combined dairy products are beneficial for human health due to the presence of both cow's milk components and fermentation products and, especially, live microflora, which has probiotic properties.

Target setting. Traditional fermented drinks based on cow's milk (yogurts) have a thick consistency and a corresponding pleasant taste. And if it is easy to get a pleasant taste of a product based on plant milk, especially such as coconut and almond, obtaining a dense consistency or an unbreakable clot is problematic and difficult without the use of thickeners or structure-forming agents. Therefore, the authors consider it advisable, firstly: to use not only plant types of milk, but also their mixtures with cow's milk, and secondly: to use such stabilizers, which, in turn, will also increase the biological value of the resulting product.

Actual scientific researches and issues analysis. Walnut is a promising raw material for the production of vegetable drinks thanks to its rich composition. It contains significant amount of proteins, unsaturated fatty acids (especially omega-3), vitamins (group B, E), minerals (calcium, magnesium, iron, zinc) and antioxidants such as polyphenols. These components contribute to improvement of general health, in particular support the work of cardiovascular and nervous systems, as well as strengthen the immunity. General oils content in the nuclei oscillates from 60.9% to 73.1%, and the crude protein content is from 13.5% to 20.2%. The main fatty acids in walnut oil are oleic, linoleic, linolenic and palmitic acids, while linoleum acid content fluctuates from 48.9% to 58.2%, and oleic acid from 20.0% to 25.3% [1].

In studies [2, 3] amino acid composition was analyzed and amino acid score of protein of walnut and drink based on was calculated. Comparison of the amino acid composition of the studied products with the reference protein made it possible to calculate the utility coefficient, which is 0.58 for the drink protein and 0.62 for the nut protein, which reflects the level of protein digestibility. Biological value of walnut drink, determined by the coefficient of differences of amino acid composition, is 62.96 %, which is high indicator for plant protein [2; 3].

It is known that along with the taste, nutritional value and benefits of yogurt, the appearance and consistency of the product are important for consumers [4]. Milk-protein gel is formed as a result of the vital activity of lactic acid bacteria, which ferment milk sugar to lactic acid and other derivatives. As a result of the increase in the concentration of Hydrogen ions, casein coagulation occurs with the formation of a spatial structural system, which determines the structural and mechanical properties that characterize the further behavior of the product under conditions of deformations that arise during the technological process [5]. For mixed yogurt, the destruction of the structure occurs immediately after fermentation. Mixed yogurt can be considered as a dispersion of gel particles in whey, but re-formation of bonds occurs, which soon create a weak gel structure [6]. In yogurt based on a mixture of plant and animal milk, due to the reduction in the amount of lactose, there is a problem of liquid consistency and the use of additives. Thus, in the work [7], the technology of using traditional thickeners is investigated: agar-agar, gelatin. Experiments were also conducted using corn starch, chia seeds and flax. Using the mentioned thickeners, they were first dissolved in a small volume of room temperature plant-based milk and withstood for a certain time. The remaining milk was heated to 60 °C, then the milk with thickener was added, the mixture was heated to 60 °C, and then cooled to 40 °C. For the fermentation of the product, the pure sourdough was added to prepared semi-finished product. Yogurt starter – mixture is presented by Bulgarian rods and thermophilic streptococcus or dry probiotic in powder form or capsules [7]. The obtained samples had better structural and mechanical properties than the control samples without structure-forming agents.

Also, the influence of food additives on the organoleptic, structural-mechanical and physico-chemical properties of yogurt was studied in [8]. Pumpkin powder, which consists of 60% dietary fiber and 15% pectin substances was used. It was added to the ready-made curd in an amount of 2 to 10%. It was found out that pumpkin powder, as a source of dietary fiber, pectin substances, vitamins, macro- and microelements, also allows to improve the structure of yogurt significantly. At optimal concentration of 1.5–3.5%, it has a positive effect on organoleptic and structural- mechanical product properties. With the increase of additive concentrations emergence of too pronounced smell and taste of pumpkin, as well as excessive density consistency were observed [8].

In the article [9], the appropriateness of using starch molasses with different degree of saccharification in the composition yogurts was scientifically justified. The dependence of conditional yogurt viscosity and ability of its clots to hold moisture on the degree of saccharification of molasses was detected. It has been proven that caramel-type molasses, which contains dextrans, has the highest ability to structure. Insignificant deceleration in process fermentation in the presence of higher sugars in low and medium dextrose molasses equivalent was recorded, while molasses with high degree saccharification almost has no effect on activity lactic acid bacteria.

Among various starch products the most promising for use in fermented milk drinks are dry glucose syrups and maltodextrins that do not require additional water introduction and are convenient for storage and use. It has been established that high contents of higher sugars in maltodextrins lengthens, and the increase of monosaccharides in syrups and molasses accelerates process fermentation of dairy mixtures in the production of yogurt and bioyogurt with a fat content of 0.05-1.0 % [10].

In the article [11] based on experimental data a recipe and technology of yogurt for the elderly people with the addition dietary fiber and substitute sugars — fructose has been developed. Yogurt was made by the tank method with a fat content of 2.5%. For fermentation direct application of bacterial preparation FD DVS ABY-3 was used. Yogurt production was carried out in two stages: in the first stage, fructose was added in various doses for sweetening, and in the second stage, oat flakes were added to the chilled yogurt. [11].

The authors [12] investigated the antioxidant properties of plants such as Chinese lemongrass, blood-red hawthorn, rose hips, sea buckthorn, three-parted string, and sage in fermented milk drinks. Pectin was used as a stabilizer.

Non-traditional herbal ingredients that can be used as fillers for yogurts are poppy and sesame seeds. Adding them in a ratio of 1:1 in an amount of 5% of general yogurt mass allows to maintain the structure, consistency and viscosity of the product without forming serum [13].

As a stabilizer of the consistency of fermented beverages, it is also possible to use plantain seeds [14]. Dietary fibers obtained from the seeds of plantain oval and flea are designated by the term "psyllium", and in foreign literature the term "isvagul" is also used. It contains up to 85% soluble fiber, vitamins of group B1, B2 and B3, trace elements: Zn, Mg, Ca, Co, Cr and others, as well as polyunsaturated fatty acids. In terms of its properties, the husk of plantain seeds differs from many dietary fibers and, due to the presence of fiber, is able to exhibit gel-forming properties [15].

Energy value of psyllium is 42-46 kcal, as it almost doesn't contain easily digestible carbohydrates. The chemical composition is also represented by uronic acids, tannins, flavonoids, carotenoids, polysaccharides, saponins, mucilages, ascorbic acid, organic acids. Psyllium has almost no smell and taste of its own [15].

Experimental studies indicate the presence of hypoglycemic and hypolipidemic properties in psyllium, therefore its consumption provides prevention of the development of atherosclerosis and other diseases of the cardiovascular system [16].

The possibility of using psyllium together with pectin in the formulation of ice cream based on almond and hemp milk was proven in [17], where attractive organoleptic and technological characteristics were noted.

The addition of psyllium husk improves the body, consistency, appearance and mouthfeel and slows down the syneresis of cow's milk yoghurt [18]. It has been observed that with the increase of fibre levels, the sour taste sensation increases. The increase of acid with increasing psyllium husk content is explained by the prebiotic effect, which may have supported the growth of *L. bulgaricus* and *S. thermophilus*, leading to greater acid production. Overall, in terms of sensory characteristics, yoghurt enriched with 0.5% psyllium husk had the highest overall acceptability [18].

Uninvestigated parts of general matters defining

Literature review showed that a large number of studies are being conducted to find effective consistency stabilizers in the technology of fermented beverages, however, beverages based on a mixture of nut and cow's milk have not been studied, and the search for plant components that would simultaneously improve consistency and be a source of dietary fiber and other biologically active substances has not been conducted.

The research objective is the development of a fermented drink based on nut milk enriched with psyllium seed husk and the assessment of its quality according to physicochemical, organoleptic and microbiological indicators.

The statement of basic materials. The main raw material used in the production of fermented drinks, enriched with psyllium is walnut milk. Walnuts that comply with DSTU (The State Standards of Ukraine) 8900:2019 "Walnuts. Technical conditions" were used for the production of plant milk. According to the standard, they have undamaged, light kernels. The consistency is crispy. The taste and smell are inherent, without bitterness, moderately oily.

Additional raw material – cow's milk TM "Ferma", which corresponds with the requirements of DSTU 2661: 2010 "Drinking cow's milk. General technical conditions". The mass proportion of fat is 2.5 %, protein – 2.8%.

Fermentation was carried out using dry bacterial starter "Yogurt Vivo ", manufactured in accordance with TU (Technical conditions) 15.5-3060300036-001:2009 "Bacterial starters". The starter contains: *Streptococcus thermophilus*, *Lactobacillus delbrueckii ssp*, *Bulgaricus*, *Lactobacillus acidophilus*, *Bifidobacterium lactis*. The starter culture provides a number of lactic acid microorganisms of at least 10^7 . It inhibits the growth of pathogenic and conditionally pathogenic bacteria in the human body.

The additive used is psyllium husk of psyllium seeds (TM SoloSvit). It complies with TU No. 10.8-42063780-001: 2018. Its water absorption capacity was assessed using the gravimetric (weight) method.

According to quality indicators (organoleptic, physicochemical and microbiological), the finished product - yogurt must comply with DSTU 4343:2004 "Yogurts. General technical conditions". The finished product was evaluated according to the following organoleptic indicators: consistency, appearance, taste, color, smell. Acidity was determined by titration, density - by the areometric method, pH - by the potentiometric method, determination of the mass fraction of protein - by the formalin titration method; bacteria of the *Escherichia coli* group were determined by sowing on liquid Endo medium, the presence of yeast was determined by sowing on liquid medium Sabouraud [19].

The research conducted included:

1. Production and analysis of nut milk and a number of its mixtures with cow's milk.
2. Fermentation of the resulting mixtures with different dosages of psyllium.

Nut milk was made by grinding nut kernels in an aqueous medium. From previously soaked nuts for 12 hours at a temperature of 20–25 °C the shells were separated from the walnut kernels, then the kernels were ground in water (at the rate of 100 g of nuts per 500 ml of water) using a blender for 180 seconds at a speed of 10,000 rpm. Then the mixture was infused for 30 minutes and ground again for 60 seconds at a speed of 12,000 rpm. The cake was separated using a filter.

The study of the quality indicators of fermented drinks with a combined composition was carried out for mixtures of 50:50 and 60:40 volume percentages of nut and cow's milk. The control was a drink based on cow's milk. The content of plantain seed husk was 1.0%, 1.5%, 2.0% of the mass of all mixtures and the control.

The milk was heated to a temperature of 40 °C, the "Yogurt Vivo" starter was added and fermented at a temperature of 40 °C for 4 hours. Psyllium (pharmacy) was added in its pure form, without prior preparation, 30 minutes after the start of fermentation.

Analysis of nut milk, cow's milk and their mixtures was carried out using the Milkotester milk analyzer Master ECO by a number of indicators: fat, dry non-fat milk residue, density, freezing point, protein, lactose, mineral salts, added water. Analysis of all samples were carried out at a temperature of 30°C. Results of the analysis are presented in Fig. 1.

Analysis of the mixtures showed that cow's milk has a higher content of dry non-fat residue, mineral salts, higher density, lower freezing point compared to nut milk. Nut milk has a higher fat content. The mixtures have intermediate results in terms of indicators.

Plant-based milk drinks contain less milk sugar, which forms a milk-protein gel as a result of the activity of lactic acid bacteria, so the technology of the fermented nut milk drink required the use of a plant additive that improves the consistency and at the same time enriches the finished drink with substances beneficial to health.

To determine the feasibility of using Psyllium as a stabilizer of the resulting drink the study of its moisture absorption capacity has been carried out.

A weight of psyllium was soaked in water, nut milk, and cow's milk and left to stand for 0-40 minutes. 1 gram of psyllium was placed in a container with small holes and immersed in another container of water. Every 5 minutes, the container with the weight was removed and weighed.

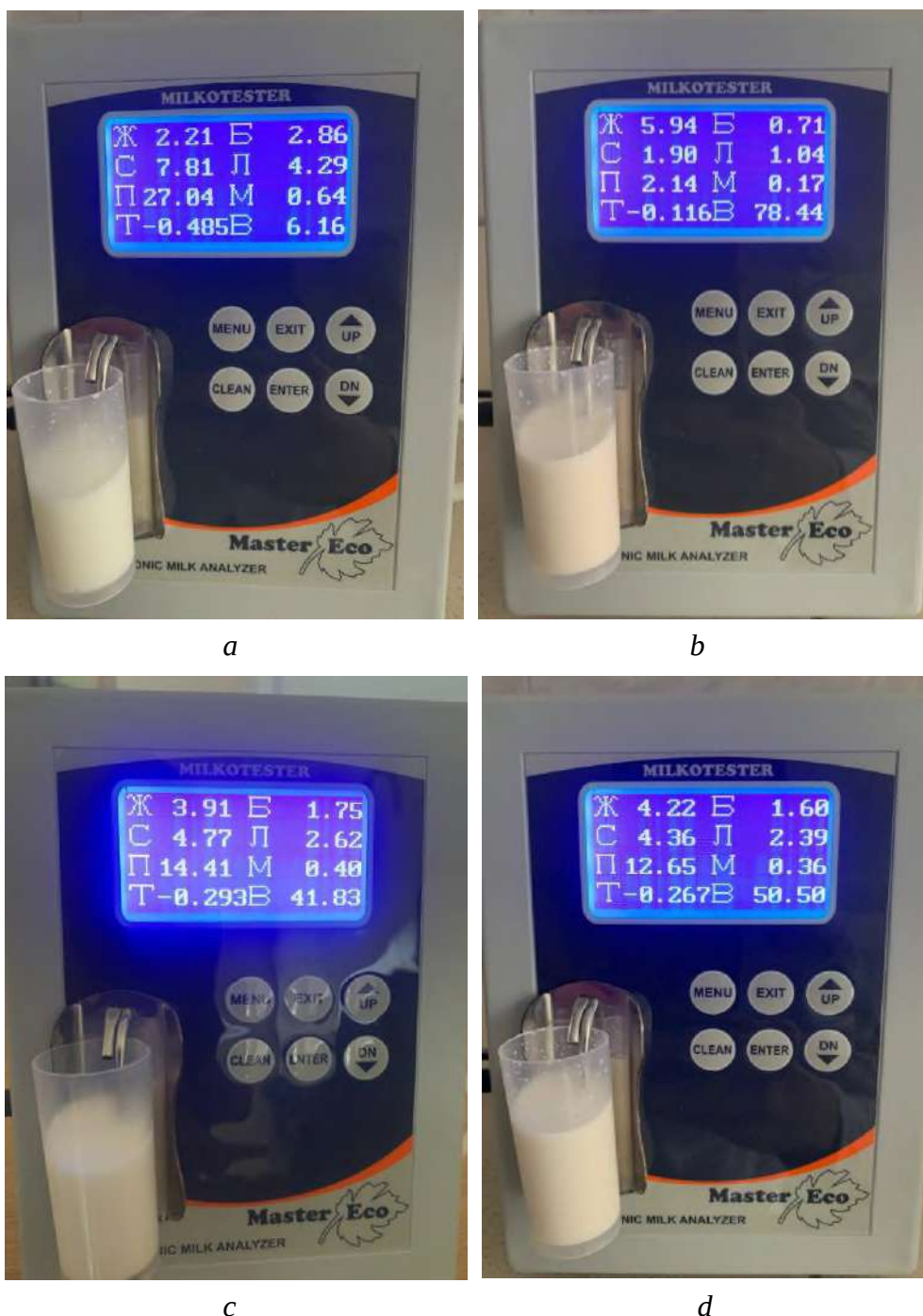


Fig. 1. Photo of the results of the analysis of cow 's milk (a), nut milk (b), a 50:50% mixture (c), a mixture of 60% nut milk and 40% cow 's milk (d):

Ж – fat; Б – protein; С – dry dehydrated milk residue; Л – lactose;
П – density; М – mineral salts; Т – freezing point; В – added water

Source: developed by the authors.

Influence of all liquids on the process of swelling was determined by the magnitude of the limiting degree swelling. Degree swelling was defined as the ratio between the mass of absorbed liquid and initial mass of seeds. The measurement results are shown in Fig. 2.

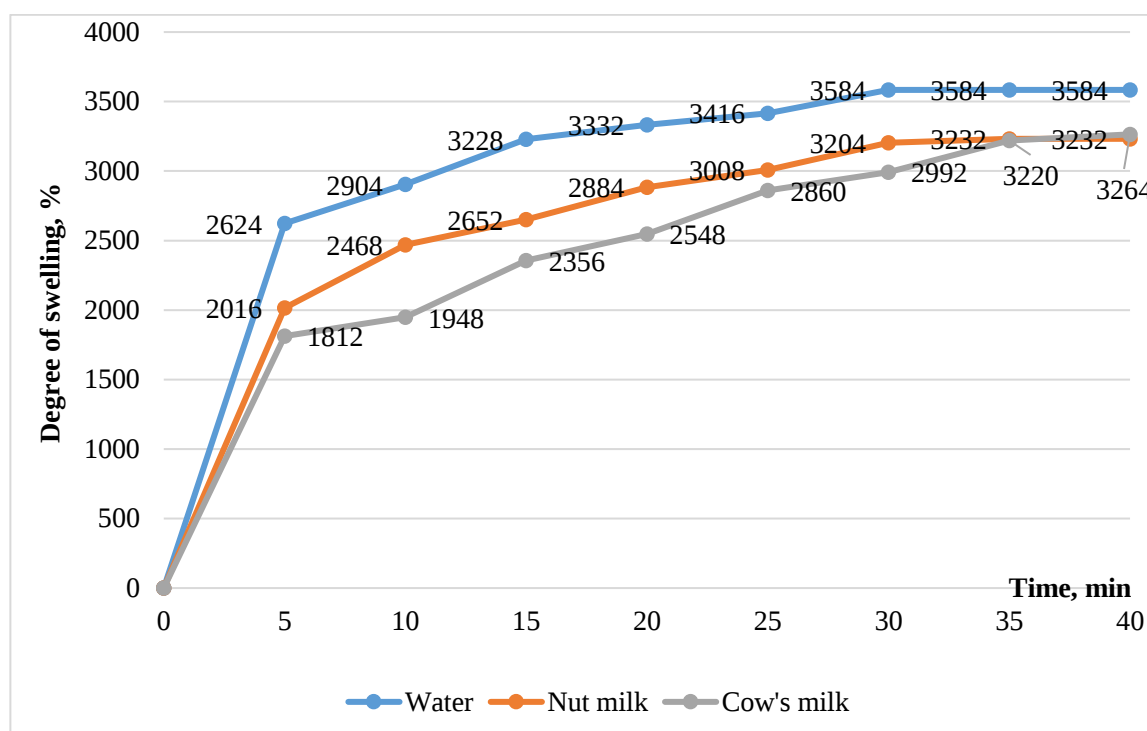


Fig. 2. Dependence of moisture absorption capacity on time

Source: developed by the authors.

The obtained data indicate intensive water absorption by psyllium during the first five minutes, then the speed of the process slows down, as evidenced by a less intensive mass growth. The highest degree of swelling was observed in water. In nut and cow's milk, the process of water absorption occurs more slowly, which is associated with the presence of electrolytes, in particular calcium salts and other minerals. They are able to form hydrated shells, retaining part of the low-molecular liquid and preventing its interaction with the macromolecules of high-molecular substances of the seed shell. The swelling process is the least effective in cow's milk, since it has a higher viscosity.

The results of studies of physicochemical and organoleptic quality indicators of fermented beverage samples are presented in Tables 1, 2 (for a ratio of nut milk to cow's milk of 50:50) and 3 (for a ratio of nut milk to cow's milk of 60:40), in which, respectively:

- sample 1 – cow's milk yogurt;
- sample 2 – fermented milk mixture drink without psyllium;
- sample 3 – fermented drink of a mixture of milk and 1% psyllium;
- sample 4 – fermented drink from a mixture of milk and 1.5% psyllium;
- sample 5 – fermented drink from a mixture of milk and 2% psyllium.

Table 1 – Physicochemical properties of samples at a 50:50 nut-to-cow milk ratio

Indicator	Sample No.				
	1	2	3	4	5
Density, kg / m ³	1136	1013	1030	1070	1180
Titrated acidity, ° T	74.5	50.5	46.5	54.5	20.0
Active acidity, pH units	4, 4 7	4.55	4.43	4.47	4.48
Mass fraction of protein, %	3.5	2.5	2.4	2.4	2.4
Mass fraction of moisture, %	87.4	88.0	88.8	88.4	88.9
Mass fraction of dry matter%	12.6	12.0	11.2	11.6	11.1

Source: developed by the authors.

*Table 2 – Organoleptic characteristics of samples at a 50:50 nut-to-cow milk rati **

Indicator	Sample No.				
	1	2	3	4	5
Consistence	Homogeneous, with a broken clot	Liquid, homogeneous	Thick, with psyllium inclusions	Thick, homogeneous, with psyllium flakes	Very viscous, jelly- like
Color	White	Light gray	Light pink	Light pink	Gray with a pink tint
Scent	Pure fermented milk	Light nutty scent	Light nutty scent	Light nutty scent	Faint nutty smell
Taste	Pure fermented milk	Pleasant taste, slightly earthy	Pleasant taste, slightly earthy	Pleasant taste, without an earthy aftertaste	Pleasant taste, without an earthy aftertaste

* Organoleptic indicators of samples with a ratio of nut and cow's milk of 60:40 practically did not differ from the 50:50 ratio.

Source: developed by the authors.

Table 3 – Physicochemical properties of samples at a 60:40 nut-to-cow milk ratio

Indicator	Sample No.				
	1	2	3	4	5
Density, kg / m ³	1136	1010	1020	1066	1150
Titrated acidity, ° T	74.5	57.5	56.3	53.5	32.0
Active acidity, pH	4,47	4.55	4.39	4.40	4.46
Mass fraction of protein, %	3.5	2.4	2.3	2.3	2.3
Mass fraction of moisture, %	87.4	89.1	89.2	89.5	89.9
Mass fraction of dry matter, %	12.6	10.9	10.8	10.5	10.1

Source: developed by the authors.

Analysis of the data obtained showed that the addition of psyllium contributes to an increase in the density of the product by 17-67 kg/m³ depending on its concentration for 50:50 mixtures and by 10-50 kg/m³ – for mixtures 60:40. The highest value of titrated acidity was in the control sample, and with the increasing psyllium content, acidity decreases by 30%. Active acidity decreases slightly.

The mass fraction of protein compared to the control sample is lower, but almost does not change with the increase of psyllium content. A slight increase in the mass fraction of moisture (2 %) is observed with the increase of psyllium content, which may be due to its strong moisture absorption capacity.

According to organoleptic evaluation, samples with 2% psyllium have a jelly-like consistency that is not typical for a drink, samples without added psyllium and with 1% have an earthy taste. The color and smell of all samples are similar, their intensity slightly decreases with the increasing content of the additive.

Based on the conducted physicochemical and organoleptic studies of the quality indicators of the manufactured samples, a fermented drink prepared from 60% nut milk and 40% cow's milk with the addition of 1.5% psyllium seed husk was selected as the optimal one.

Shelf life studies were conducted by measuring the titrated acidity of the following samples: control (yogurt made from cow's milk), fermented beverages with a volume ratio of 50:50 and 60:40 walnut and cow's milk with the addition of 1.5% psyllium husk on the first, fourth, seventh and tenth days. The samples were stored in refrigerated conditions at a temperature of 5°C for 10 days. The results are shown in Fig. 3.

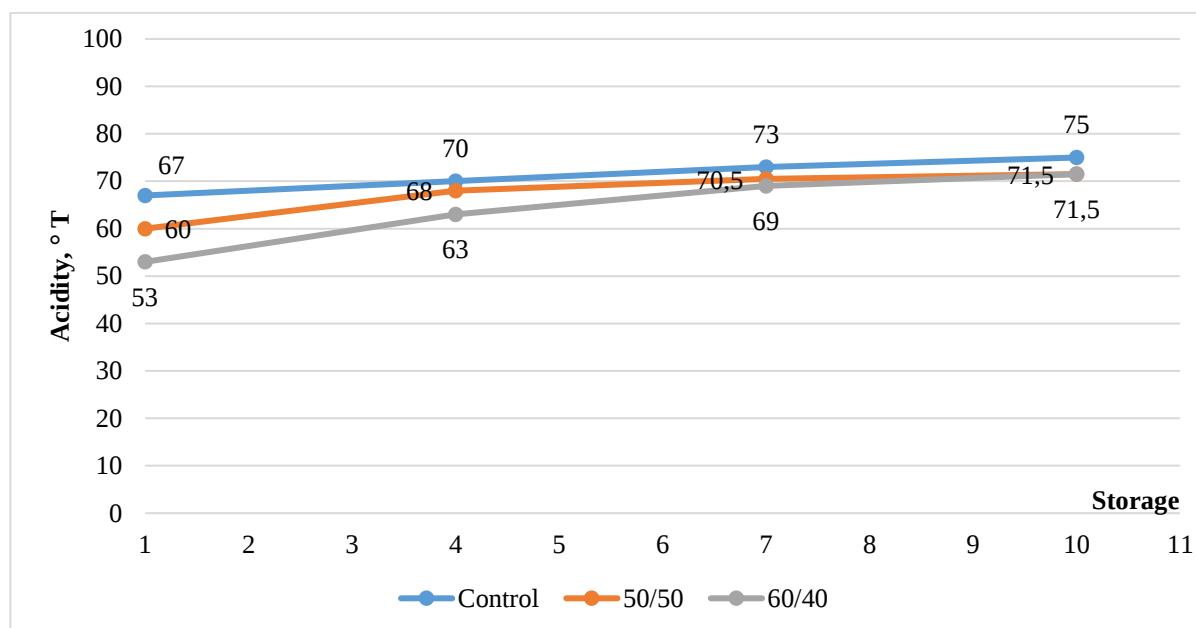


Fig. 3. Dynamics of titrated acidity during storage

Source: developed by the authors.

The obtained data indicate both lower initial acidity values of samples with psyllium and a decrease in the intensity of the increase in acidity of beverages after 7 days of storage. During the 10 days of study, no whey separation was observed in the sample with the addition of psyllium, while partial syneresis was observed in the control sample.

A microbiological evaluation of the optimal sample of fermented beverage was also conducted. The results of the studies are presented in Table 4. Neither *Escherichia coli* nor yeast were detected in the studied samples.

Table 4 – Microbiological studies [20]

Indicator name	Requirements	Actual content
Bacteria of the Coliform Group in 0.1 cm ³	not allowed	not detected
Yeast, CFU in 1 cm ³	no more than 50	not detected

The energy value of the optimal sample with 60% walnut milk whey and 1.5% psyllium was calculated based on the chemical composition of the raw material components (Figure 1) and their content in the developed product (Table 5).

Table 5 – Chemical composition of raw materials [21]

Raw	Content of components in 100 g of product		
	Proteins, g	Fats, g	Carbohydrates, g
Walnut milk	0,420	3,511	0,615
Cow 's milk	1,130	0,870	1,690
Psyllium	0,023	0,009	1,275
Together	1,573	4,390	3,580

The energy value of the developed product was calculated according to formula (1), based on the energy value of proteins, fats and carbohydrates, respectively:

$$EV = (P \times 4) + (F \times 9) + (C \times 3,8) \quad (1)$$

where EV is the energy value;

B – protein content in 100 grams of product;

F – fat content in 100 grams of product;

C – carbohydrate content in 100 grams of product.

Thus, the resulting fermented drink based on a mixture of nut and cow's milk with the addition of 1.5% psyllium is tasty, of high-quality and safe for the consumer. Its calculated energy value is 60 kcal (251 kJ), which correlates with the nutritional value of the base product - traditional yogurt on cow's milk, the energy value of which is 51-66 kcal [22].

The drink is enriched with beneficial walnut components and dietary fiber from the husk of plantain seeds, which additionally give the drink prebiotic properties, bind water, and have an enveloping and anti-inflammatory effect on the intestinal mucosa.

Conclusions. The method of obtaining a fermented drink containing 60% nut milk by double grinding of walnuts, using dry bacterial starter "Yogurt Vivo" and adding psyllium 30 minutes after the start of fermentation has been theoretically substantiated. The most appropriate concentration of the psyllium additive has been determined, which is 1.5%, which gives the finished product high organoleptic indicators and nutritional and biological value. The physicochemical and microbiological indicators of the drinks have been analyzed, the resulting products comply with regulatory documentation and are safe for the consumer, the energy value of the drink has been calculated - 60 kcal.

References

1. Orchards Sara Aryapak, Parisa Ziarati. (2014). Nutritive Value of Persian Walnut (*Juglans regia* L.) Orchards. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 14(11), 1228-1235.
2. Savchuk, Yu.Yu., Usatiuk, S.I. (2017). Doslidzhennia biolohichnoi tsinnosti napoiu z yader voloskoho horikha [Research on the biological value of a drink from walnut kernels]. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnologii imeni S. Z. Gzhytskoho. Serii: Kharchovi tekhnologii – Scientific Bulletin of the Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology named after S. Z. Gzhytsky. Series: Food Technologies*, 19(75), 124-128. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvlnuftech_2017_19_75_27.
3. Savchuk, Yu.Yu., Usatiuk, S.I., Yanchyk, O.P. (2016). Doslidzhennia dyspersnosti napoiu z voloskoho horikha [Research on the dispersion of a walnut drink]. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnologii imeni S. Z. Gzhytskoho. Serii: Kharchovi tekhnologii – Scientific Bulletin of the Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology named after S. Z. Gzhytsky. Series: Food Technologies*, 18(2), 83-86. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvlnuftech_2016_18_2_18.
4. Lee, W.J., Lucey, J.A. (2010). Formation and physical properties of yogurt. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 23(9), 1127-1136.
5. Petridis, D., Dimitreli, G., Chrysalidou, S., Akakiadou, P. (2013). Optimization of the rheological and sensory properties of stirred yogurt as affected by chemical composition and heat treatment of buffalo milk. *Journal of Food Research*, 2(6), 55-71.
6. Lucey, J.A. (2004). Cultured Dairy Products: An Overview of Their Gelation and Texture Properties. *International Journal of Dairy Technology*, 57, 77-84.
7. Tverdokhlib, A.A., Dotsenko, Yu.I. (2019). Alternatyvnyi yohurt z roslynnoi syrovyny [Alternative yogurt from plant raw materials]. *Problemy formuvannia zdorovoho sposobu zhyttia u molodi: XII Vseukr. nauk.-prakt. konf. molodykh uchenykh ta studentiv z mizhnar. Uchasti – XII All-Ukrainian scientific-practical conference of young scientists and students with international participation* (pp. 172-174). FOP Bondarenko M. O.
8. Martynenko, P.Iu., Blyzniuk, O.M. (2018). Optyimizatsiia reolohichnykh vlastyvostei v biotekhnologii vyrobnytstva yohurtu [Optimization of rheological properties in the biotechnology of yogurt production]. *Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnologii, osvita, zdorovia: XXVI mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD-2018 – XXVI international scientific and practical conference MicroCAD-2018* (p. 265). NTU «KhPI».
9. Marchenko, T.S., Polishchuk, H.Ye. (2017). Naukove obgruntuvannia dotsilnosti vykorystannia krokhmalnoi patoky u skladi yohurtiv [Scientific justification of the feasibility of using starch molasses in yogurts]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnologii – Scientific works of the National University of Food Technologies*, 23(1), 240-247. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnu-kht_2017_23_1_30.

10. Ivashchenko, O.M., Polishchuk, H.Ye. (2023). Doslidzhennia pokaznykiv yakosti yohurtiv z maltodekstrynom i sukhym hliukoznym syropom [Research on the quality indicators of yogurts with maltodextrin and dry glucose syrup]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnologii – Scientific works of the National University of Food Technologies*, 29(4), 162-175. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2023_29_4_15.

11. Tisaryk, O.Y., Musii, L.Ya., Koval, H.M., Slyvka, I.M. (2022). Rozroblennia tekhnologii yohurtu z herodiietychnymy vlastyvostiamy [Development of yogurt technology with herodietic properties]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnologii – Scientific works of the National University of Food Technologies*, 28(5), 105-117. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2022_28_5_13.

12. Hoiko, I.Yu. (2014). Vykorystannia roslynnoi syrovyny yak zbahachuvacha kyslomolochnykh napoiv z antyoksydantnymy vlastyvostiamy [The use of plant raw materials as an enricher of fermented milk drinks with antioxidant properties]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnologii – Scientific works of the National University of Food Technologies*, 20(1), 240-247. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2014_20_1_33.

13. Motuzka, Yu., Tatarova, D. (2019). Innovatsii na rynku yohurtiv funktsionalnoho pryznachennia [Innovations in the market of functional yogurts]. *Stan i perspektyvy kharchovoi nauky ta promyslovosti: V Mizhnarodna naukovo-tekhnicna konferentsiia – State and prospects of food science and industry: abstracts of the V International Scientific and Technical Conference* (pp. 166–167). Ternopilskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet imeni Ivana Puliua.

14. Zamai, Zh.V., Ihnatenko, A.V. (2023). Vykorystannia stabilizatoriv konsystentsii v tekhnologii fermentovanykh napoiv na roslynnomu molotsi [Use of consistency stabilizers in the technology of fermented beverages based on plant milk]. *Naukovi problemy kharchovykh tekhnologii ta promyslovoi biotekhnologii v konteksti yevrointehratsii: XII Mizhnarodna nauk.-tekhn. konf. – Scientific problems of food technologies and industrial biotechnology in the context of European integration: XII International Scientific and Technical Conference* (pp. 195-197). NUKhT.

15. Stetsenko, N., Halushko, M. (2021). Kharakterystyka psylliumu yak perspektyvnoho dzherela kharchovykh volokon pry vyrobnytstvi produktiv ozdorovchoho pryznachennia [Characteristics of psyllium as a promising source of dietary fiber in the production of health-promoting products]. *Ozdorovchi kharchovi produkty ta diietychni dobavky: tekhnologii, yakist ta bezpeka: Mizhnar. nauk.-prakt. konf. – Health-promoting food products and dietary supplements: technologies, quality and safety: materials of the International Scientific-Practical Conference* (pp. 47-49). NUKhT.

16. Elli, M., Cattivelli, D., Soldi, S., Bonatti, M., Morelli, L. (2008). Evaluation of prebiotic potential of refined psyllium (*Plantago ovata*) fiber in healthy wome. *J. Clin. Gastroenterol*, 2, 174-176.

17. Leahu, A., Ropciuc, S., & Ghinea, C. (2022). Plant-Based Milks: Alternatives to the Manufacture and Characterization of Ice Cream. *Applied Sciences*, 12(3), 1754.

18. Nuzhat, H., Asif, I., Tahir, Z., & Butt, M. S. (2003). Effect of Psyllium husk fibre on the quality of sweetened stirred yogurt. *Pakistan Journal of Food Science*, 13(1–2), 1–4.

19. Vitriak, O., Zamai, Zh., Fabrichenko, K. (2023). Bezlaktozni yohurty z dodavanniam roslynnoi syrovyny [Lactose-free yogurts with the addition of plant raw materials]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical Sciences and Technologies*, 4(34), 138-146.

20. DSTU 4343:2004 “Iohurty. Zahalni tekhnichni umovy” [DSTU 4343:2004 Yogurts. General technical conditions]. (2005). Derzhspozhyvstandart Ukrainy.

21. Psyllium PREMIUM TM “SOLOSvit”, 200 h [Psyllium PREMIUM TM “SOLOSvit”, 200 g]. *SoloSvit*. <https://solosvit.com.ua/katalog/psillium-tm--solo>.

22. Reshetylo, I.L., Nakonechnyi, M. N. (2019). Yohurt yak produkt likuvalno-profilaktychnoho pryznachennia ta yoho microflora [Yogurt as a product of therapeutic and prophylactic purpose and its microflora]. *Aktualni problemy ekonomiky i torhivli v suchasnykh umovakh: materialy shchorichnoi nauk. konf. vchenykh Lvivskoho torhovelnno-ekonomichnoho universytetu – Current problems of economy and trade in modern conditions: materials of the scientific conference of scientists of the Lviv University of Trade and Economics* (pp. 197–199). Vyd-vo Lvivskoho torhovelnnoekonomichnoho universytetu.

Список використаних джерел

1. Orchards Sara Aryapak, Parisa Ziarati. (2014). Nutritive Value of Persian Walnut (*Juglans regia* L.) Orchards. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, (14(11)), 1228-1235.

2. Савчук, Ю.Ю., Усатюк, С.І. (2017). Дослідження біологічної цінності напою з ядер волозького горіха. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. Серія : Харчові технології*, 19(75), 124-128.
3. Савчук, Ю.Ю., Усатюк, С.І., Янчик, О.П. (2016). Дослідження дисперсності напою з волоського горіха. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. Серія: Харчові технології*, 18(2), 83-86. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvlnuftech_2016_18_2_18.
4. Lee, W.J., Lucey, J.A. (2010). Formation and Physical Properties of Yogurt. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 23(9), 1127-1136. <https://doi.org/10.5713/ajas.2010.r.05>.
5. Dimitris Petridis [et al.]. (2013). Optimization of the Rheological and Sensory Properties of Stirred Yogurt as Affected by Chemical Composition and Heat Treatment of Buffalo Milk. *Journal of Food Research*, 2(6), 55. <https://doi.org/10.5539/jfr.v2n6p55>.
6. Lucey, J.A. (2004). Cultured dairy products: an overview of their gelation and texture properties. *International Journal of Dairy Technology*, 57(2-3), 77-84. <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.2004.00142.x>.
7. Твердохліб, А.А., Доценко, Ю.І. (2019). Альтернативний йогурт з рослинної сировини. *Проблеми формування здорового способу життя у молоді : зб. матеріалів XII Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів з міжнар. участю (с. 172-174). ФОП Бондаренко М. О.*
8. Мартиненко, П.Ю., Близнюк, О.М. (2018). Оптимізація реологічних властивостей в біотехнології виробництва йогурту. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2018 (ч. II, с. 265). НТУ «ХП»*.
9. Марченко, Т.С., Поліщук, Г.Є. (2017). Наукове обґрунтування доцільності використання крохмальної патоки у складі йогуртів. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 23(1), 240-247. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2017_23_1_30.
10. Іващенко, О.М., Поліщук, Г.Є. (2023). Дослідження показників якості йогуртів з мальтодекстрином і сухим глюкозним сиропом. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 29(4), 162-175. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2023_29_4_15.
11. Цісарик, О.Й., Мусій, Л.Я., Коваль, Г.М., Сливка, І.М. (2022). Розроблення технології йогурту з геродієтичними властивостями. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 28(5), 105-117. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2022_28_5_13.
12. Гойко, І.Ю. (2014). Використання рослинної сировини як збагачувача кисломолочних напоїв з антиоксидантними властивостями. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 20(1), 240-247. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2014_20_1_33.
13. Мотузка, Ю., Татарова, Д. (2019). Інновації на ринку йогуртів функціонального призначення. *Стан і перспективи харчової науки та промисловості : тези доповідей V Міжнар. наук.-техн. конф. (10–11 жовтня 2019 року, м. Тернопіль) (с. 166-167). Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*.
14. Замай, Ж.В., Ігнатенко, А.В. (2023). Використання стабілізаторів консистенції в технології ферментованих напоїв на рослинному молоці. *Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції: XII Міжнар. наук.-техн. конф. (с. 195-197). НУХТ*.
15. Стеценко, Н., Галушко, М. (2021). Характеристика псиліуму як перспективного джерела харчових волокон при виробництві продуктів оздоровчого призначення. *Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека: Міжнар. наук.-практ. конф. (с. 47-49). НУХТ*.
16. Marina, Elli [et al.]. (2008). Evaluation of Prebiotic Potential of Refined Psyllium (*Plantago ovata*) Fiber in Healthy Women. *Journal of Clinical Gastroenterology*, 42, S174-S176. <https://doi.org/10.1097/mcg.0b013e31817f183a>.
17. Leahu, A., Ropciuc, S., Ghinea, C. (2022). Plant-Based Milks: Alternatives to the Manufacture and Characterization of Ice Cream. *Applied Sciences*, 12(3), 1754. <https://doi.org/10.3390/app12031754>.
18. Nuzhat, H., Asif, I., Tahir, Z., Butt, M.S. (2003). Effect of Psyllium husk fibre on the quality of sweetened stirred yogurt. *Pakistan Journal of Food Science*, (13(1-2)), 1-4.

19. Вітряк, О., Замай, Ж., Фабріченко, К. (2023). Безлактозні йогурти з додаванням рослинної сировини. *Технічні науки та технології*, (4(34)), 138-146. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4\(34\)-138-146](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4(34)-138-146).

20. ДСТУ 4343:2004 Йогурти. Загальні технічні умови. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 14 с. (Національні стандарти України). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72933.

21. Псиліум ПРЕМІУМ ТМ "СОЛОСВИТ", 200 г. SoloSvit. <https://solosvit.com.ua/katalog/psilium-tm—solo>.

22. Решетило, І.Л., Наконечний, М.Н. (2019). Йогурт як продукт лікувально-профілактичного призначення та його мікрофлора. *Актуальні проблеми економіки і торгівлі в сучасних умовах: матеріали наук. конф. вчених Львівського торговельно-економічного університету* (с. 197–199). Вид-во Львівського торговельно-економічного університету.

Отримано 30.01.2025

УДК 637.146.34:663.911.1

**Жанна Василівна Замай¹, Андрій Вячеславович Ігнатенко²,
Іваненко Костянтин Миколайович³**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна).

E-mail: zamaizhanna@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2879-4677>. ScopusID: 6506101557; 6506148493

² магістр

Національний університет «Чернігівська політехніка»

E-mail: aign02@ukr.net

³кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: sapr121@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9940-6523>. ScopusID: 57196196416

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ТА МІКРОБІОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ФЕРМЕНТОВАНОГО НАПОЮ НА ОСНОВІ ГОРІХОВОГО МОЛОКА

Необхідність розробки нових видів напоїв на основі рослинного молока обумовлена обмеженістю молочних ресурсів в Україні та збільшенням кількості людей, хворих на гіполактазію (непереносимість лактози). У роботі досліджуються суміші коров'ячого молока з горіховим, що дає змогу отримати низьколактозну продукцію.

Метою статті є розробка ферментованого напою на основі горіхового молока, збагаченого лузгою насіння подорожника та оцінка його якості за фізико-хімічними, органолептичними та мікробіологічними показниками.

Проведене дослідження включало:

1. Виготовлення та аналіз горіхового молока і ряду сумішей його з коров'ячим.

2. Ферментація одержаних сумішей за різного дозування псиліуму.

Горіхове молоко виготовлялось шляхом двократного подрібнення горіхового ядра у водному середовищі. Ферментацію проводили за використання сухої бактеріальної закваски «Йогурт Vivo» та внесення псиліуму як стабілізатора консистенції та джерела корисних харчових волокон через 30 хв після початку сквашування. Дослідження показників якості ферментованих напоїв з комбінованим складом проводили для сумішей 50:50 та 60:40 об'ємних відсотків горіхового і коров'ячого молока. Контролем виступав напій на коров'ячому молоці. Вміст лушпиння насіння подорожника становив 1; 1,5 та 2 %. Аналіз отриманих даних показав, що додавання псиліуму сприяє збільшенню густини продукту на 17-67 кг/м³ залежно від його концентрації для сумішей 50:50 та на 10-50 кг/м³ – для сумішей 60:40. Найвище значення титрованої кислотності було у контрольного зразка, а зі збільшенням вмісту псиліуму кислотність напою знижується на 30 %.

Визначено найбільш доцільну концентрацію добавки-псиліуму, яка становить 1,5 %, що надає готовому продукту високі органолептичні показники та харчову й біологічну цінність. Отриманий продукт відповідає нормативній документації та є безпечним для споживача, розрахована енергетична цінність напою- 60 ккал /100 г продукту.

Ключові слова: горіхове молоко; ферментований напій; псиліум; рослинна сировина; фізико-хімічні показники; харчова цінність.

Табл.: 5. Рис.: 3. Бібл.: 22.

**Світлана Олександрівна Губа¹, Наталія Вікторівна Болгова²,
Євгенія В'ячеславівна Демидова³, Олександр Олексійович Губа⁴**

¹старший викладач кафедри технологій та безпеки харчових продуктів

Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)

E-mail: s.huba@snau.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0546-7940>

ResearcherID: [V-7182-2018](https://orcid.org/0000-0002-0546-7940), **Scopus ID:** [59149322100](https://orcid.org/0000-0002-0546-7940)

²кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри технологій та безпеки харчових продуктів

Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)

E-mail: natalia.bolhova@snau.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0201-0769>

ResearcherID: [V-8442-2018](https://orcid.org/0000-0002-0201-0769), **Scopus ID:** [57217302672](https://orcid.org/0000-0002-0201-0769)

³асистент кафедри технологій та безпеки харчових продуктів

Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)

E-mail: yevheniia.demydova@snau.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7933-4251>

ResearcherID: [HMO-7329-2023](https://orcid.org/0000-0002-7933-4251), **Scopus ID:** [57685858000](https://orcid.org/0000-0002-7933-4251)

⁴магістрант факультету харчових технологій

Сумський національний аграрний університет (Суми, Україна)

E-mail: hubaalex@ukr.net, **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-0574-1205>

РОЗРОБКА РЕЦЕПТУРИ СУМІШІ ДЛЯ ПРОТЕЇНОВОГО КОКТЕЙЛЮ З ПІДВИЩЕНОЮ БІОЛОГІЧНОЮ ЦІННІСТЮ

У статті представлено етапи проектування рецептури суміші для приготування протеїнових коктейлів. Основною метою дослідження є розробка рецептури суміші для протеїнового коктейлю з підвищеною біологічною цінністю за рахунок збагачення вторинних молочних продуктів інгредієнтами-носіями біологічно цінних компонентів. У результаті проведених досліджень було розроблено проекти рецептур, досліджено ступінь впливу внесених інгредієнтів на органолептичні показники та на терміни зберігання.

Ключові слова: концентрат сироваткових білків; білкові коктейлі; порошок із ягід бузини; харчова цінність; раціон; харчування; фізико-хімічні дослідження; мікробіологічна стабільність.

Табл.: 4. Рис.: 1. Бібл.: 27.

Актуальність теми досліджень. Популяризація здорового способу життя набирає обертів і в Україні. Цілком очевидно, що здорове харчування є важливим фактором на шляху до збереження здоров'я та покращення самопочуття як на фізичному, так і на ментальному рівнях. Часто люди, які обирають такий спосіб життя, можуть не до кінця розуміти необхідність корекції поточного раціону при суттєвому підвищенні фізичних навантажень. Здоровий спосіб життя – це не лише фізична активність, а і спосіб харчування та раціон. Основою раціонального харчування є відповідність енергетичної цінності їжі добовій потребі в енергії, а також співвідношення білків, жирів, вуглеводів та наявність есенціальних речовин у харчовому раціоні.

Значна частина населення України має нестачу білкового харчування, особливо білків тваринного походження [1]. Схожа ситуація також з вітамінами та деякими мінеральними речовинами, їх дефіцит у раціонах спостерігається особливо в зимово-весняний період.

Тому з метою збільшення білкової складової в раціонах харчування доцільно додавати білкові (протеїнові) коктейлі підвищеної біологічної цінності до щоденних раціонів харчування, особливо людям із високим коефіцієнтом фізичної активності [2].

Основною цінністю протеїнових коктейлів є наявність у їхньому складі повноцінних білків [3; 4], а введення до рецептури коктейлю джерел-носіїв вітамінів та мінеральних речовин сприятиме підвищенню біологічної цінності продукту.

З огляду на популяризацію здорового способу життя попит на аналогічні продукти буде підвищуватися і надалі. Потреби ринку протеїнових коктейлів стабільні, тому розробка рецептури і технології суміші для приготування протеїнового напою підвищеної біологічної цінності за рахунок використання похідних натуральної тваринної та рослинної сировини актуальна.

Результати цього дослідження можуть бути впроваджені в харчовій промисловості для виробництва комбінованих молочних продуктів функціонального та спеціального призначення.

Постановка проблеми. Останнім часом ринок спортивного харчування України має тенденцію до розширення як за об'ємами, так і за асортиментом. Переважна більшість продукції представлена імпортними товарами, що звичайно додає їй вартості [5]. Сегмент продукції вітчизняного виробника незначний, хоча науковці працюють у цій галузі [6-8].

Основою для протеїнових коктейлів є сухі білкові концентрати та ізоляти рослинного (соевого, рисового, кукурудзяного та ін.) та тваринного (молочного) походження [8-10].

З огляду на біологічну повноцінність, молочна основа для протеїнового коктейлю більш ефективна в порівнянні з рослинними білками. Як молочну сировину в протеїнових коктейлях активно використовують продукт перероблення сироватки – концентрат сироваткових білків (КСБ).

Додавання до раціону протеїнових коктейлів на основі КСБ, безсумнівно, підвищить біологічну цінність харчування та забезпечить організм незамінними амінокислотами. Проаналізувавши хімічний склад молочних протеїнових коктейлів, дійшли висновку, що, крім альбуміну, в них нема нічого цінного. Типовий склад суміші для коктейлю на молочній основі це 90...98 % КСБ та 2...10 % підсолоджувачі, стабілізатори та ароматизатори синтетичного походження.

Замінивши в рецептурі протеїнового коктейлю синтетичні харчові добавки на натуральні інгредієнти, багаті мінеральними речовинами та вітамінами [11-13], зможемо не лише підвищити біологічну цінність готового продукту, а й нівелювати можливий негативний вплив не натуральних харчових добавок на організм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдяки високому вмісту мікроелементів та вітамінів молочну сироватку та КСБ доцільно використовувати в технологіях різних молочних напоїв [14]. Є технологія комбінування сироватки з пророщеними злаками, як компонент молочних коктейлів, як основа для квасу та слабоалкогольних напоїв, а також дослідження про використання різних видів сироватки в технологіях виробництва продуктів оздоровчого спрямування [9; 15; 16]. Якщо аналізувати її концентрат, то переважачим білком у складі концентрату сироваткових білків є альбумін – сироватковий білок, який за амінокислотним складом належить до біологічно цінних та легкозварних білків із високим ступенем засвоювання, крім того, він не є причиною виникнення алергії на молочний білок.

Особливої популярності набуває використання як харчових добавок продуктів переробки дикорослої ягідної сировини. Дослідження, проведені науковцями [17-20], доводять можливість використання такого роду інгредієнтів як цінного джерела збагачення базових продуктів харчування мінеральним та вітамінним складом.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Дефіцит харчового білка суттєво впливає на здоров'я суспільства в цілому. Особливо гостро це відчувається у людей з підвищеним рівнем фізичної активності. Вживання білкових продуктів, таких як протеїнові коктейлі може покращити якість харчування, підвищивши рівень есенціальних речовин у раціоні [21]. Багато досліджень вказують на перспективи комбінування молочних та рослинних компонентів [22-24], у цьому випадку КСБ та продуктів переробки дикорослих ягід.

Одним з основних шляхів підвищення біологічної цінності харчових продуктів є збагачення їх природними інгредієнтами, одним із перспективних шляхів розвитку використання продуктів переробки ягід є використання їх у молочних продуктах як замінників синтетичних харчосмакових добавок [19; 22; 25].

Ягоди належать до superfood, адже вони містять у своєму складі багатий вітамінний потенціал та ряд есенціальних мінеральних речовин. Крім того, солодкість ягід зумовлена наявністю фруктози, що не впливає на рівень цукру в крові та на інсулінорезистентність.

Серед широкого асортименту ягід на українському ринку досить недооціненими залишаються дикорослі ягоди. Вони, як і сотні років тому, використовуються населенням з харчовою та лікувальною метою, але так і не набули об'ємів масштабного окультурювання, переробки та використання. Відома технологія переробки дикорослих ягід, зокрема *Viburnum opulus*, *Sambucus nigra* та *Hippophae rhamnoides* L на харчові добавки у вигляді порошків які можна використовувати як наповнювачі або харчові добавки при виробництві різних видів харчової продукції [25; 26].

Ягідна сировина з дикорослих ягід використовується в харчовій промисловості не масово. Відома технологія виробництва м'ясних виробів із соком та пюре різних ягід [20]. Розроблена технологія кисломолочних напоїв з використанням концентратів ягідної сировини [22]. Відома технологія використання похідних переробки ягід при виробництві макаронних виробів та хлібобулочної продукції [27]. Крім того, сухі ягідні екстракти використовують як натуральний барвник та додаткове джерело харчових волокон, вітамінів та мікроелементів [18]. Запроваджується використання продуктів переробки дикорослих ягід як компонент начинки та наповнювач у кондитерській та інших харчових галузях [19].

Розробка рецептури сухої суміші для приготування протеїнових коктейлів з похідними переробки дикорослих ягід може бути перспективною із соціально-економічної та медико-біологічної сторони. Досліджень із подібним поєднанням компонентів нами виявлено не було, тому тема потребує більш детального вивчення.

Метою статті є розробка рецептури суміші для протеїнового коктейлю з підвищеною біологічною цінністю за рахунок збагачення вторинних молочних продуктів інгредієнтами-носіями біологічно цінних компонентів, таких як вітаміни, мінеральні речовини та харчові волокна.

Щоб досягти поставленої мети, заплановано виконання таких завдань: підібрати оптимальну за кількістю і якістю основну та додаткову сировину для продукту, розробити проекти рецептур; дослідити ступінь впливу внесених компонентів на органолептичні, фізико-хімічні, мікробіологічні показники готового продукту й на терміни зберігання. У результаті проведених досліджень було розроблено рецептуру та визначено терміни зберігання виробленого, в лабораторних умовах, за розробленою рецептурою продукту з урахуванням внесених змін.

Виклад основного матеріалу. Використання КСБ як основи сприятиме забезпеченню продукту повноцінними білками, які у своєму складі мають незамінні амінокислоти.

У зв'язку з тим, що передбачається розробка рецептури продукту для харчування спортсменів та людей важкої фізичної праці становить інтерес використання у складі їхньої рецептури КСБ.

Для реалізації експериментальних досліджень підготували контрольний зразок лише з КСБ.

У готовому контрольному зразку визначали титровану й активну кислотності, індекс розчинності та густину, органолептичні показники та проводили контрольні посіви на мікробіологічні показники. Отримані дані, що представлені в табл. 1 дозволяють відслідкувати ступінь впливу внесеного наповнювача на якісні показники продукту, порівнюючи їх з контрольним зразком.

Таблиця 1 – Показники якості приготованого контрольного зразка

Найменування показника	Значення
Органолептичні показники:	
колір	Однорідний колір з біло-молочним відтінком.
консистенція	Однорідна рідка, з невеликою кількістю осаду
смак і запах	молочно-білковий притаманний КСБ
Фізико-хімічні показники:	
титрована кислотність, °Т	19
активна кислотність, рН од.	6,44
густина, г/см ³	1,033
індекс розчинності, см ³	0,3

Джерело: розроблено авторами.

Проаналізувавши літературні джерела виявлено, що внесення порошку з похідних переробки ягід бузини, який виготовляється методом розмелювання висушених, попередньо дегідратованих у цукровому сиропі ягід, доцільно в кількості від 5 до 10 % [25]. У зазначених дослідженнях порошок вводили в продукт перед термічною обробкою, тому його смак міг бути більш виражений після термообробки. Протеїновий коктейль вживають без додаткової термообробки, тому було вирішено збільшити критичну дозу внесення до 15 % від маси сухої суміші. Розроблено 3 експериментальні рецептури (табл. 2) з внесенням бузинового порошку 5, 10, 15 %, та встановлено хімічний склад продукту розрахунковим шляхом (табл. 3).

Таблиця 2 – Склад і співвідношення компонентів у теоретично розрахованих рецептурах протеїнового коктейлю

Рецептура №	Склад і співвідношення компонентів, мас. %				
	у сухому вигляді		у приготованому вигляді		
	КСБ	Порошок з ягід бузини	КСБ	Порошок з ягід бузини	Вода
1	95	5	12,4	0,6	87
2	90	10	11,7	1,3	87
3	85	15	11,1	1,9	87

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 3 – Хімічний склад експериментальних рецептур суміші для протеїнового коктейлю, на 100 г сухої суміші

Назва	Експериментальна рецептура №		
	1	2	3
Енергетична цінність, кКал	425,6	419,6	413,2
Білки, г	76,3	72,6	68,9
Жири, г	7,6	7,2	6,8
Вуглеводи, г	13	16,1	19,1
Харчові волокна, г	0,9	1,8	2,7
Мінеральні речовини, мг			
Калій	0,03	0,06	0,09
Фосфор	0,02	0,04	0,06
Магній	0,04	0,08	0,12
Вітамін С, мг	0,2	0,4	0,6

Джерело: розроблено авторами.

Враховуючи отримані результати теоретично розрахованого складу розроблених рецептур (табл. 3), підвищення вмісту порошку закономірно призводить до підвищення вмісту вітаміну С та мінеральних речовин, а також вуглеводів, оскільки порошок з плодів бузини володіє вираженим солодким смаком і містить 71 % вуглеводів.

Вагомим показником для вибору вмісту смакового наповнювача в продукті є його органолептична оцінка, тому наступним етапом дослідження було проведення органолептичної оцінки розробленої суміші та встановлення раціональної кількості внесення порошку бузини до суміші протеїнового коктейлю.

Органолептичну оцінку проводили за 10-бальною шкалою по кожному з показників, що представлено у вигляді профілограми на рис. 1.

У результаті проведеного дослідження дегустаційною комісією було складено протокол дегустації, у якому експериментальні зразки коктейлю набрали від 37 до 46 балів. Найбільше балів набрав коктейль приготовлений за рецептурою суміші № 2 – 46 балів, що відображається на представлений профілограмі.

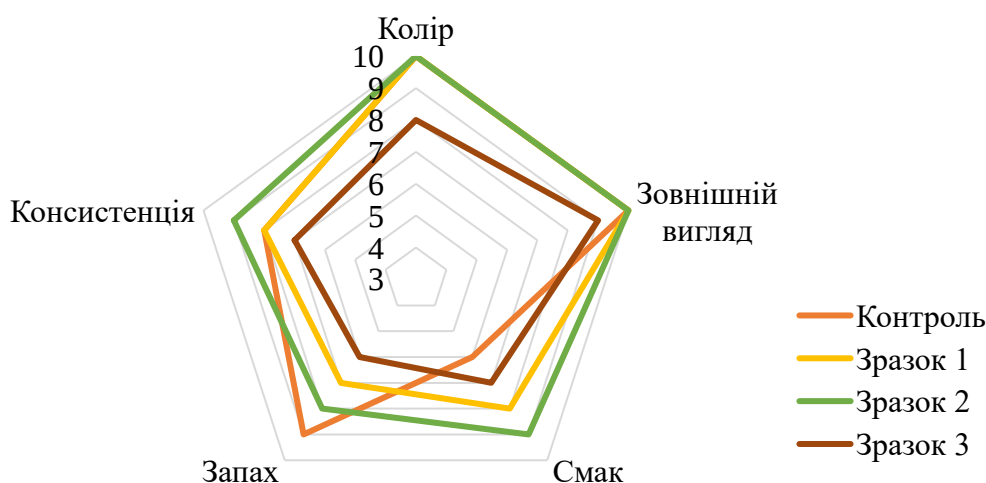


Рис. 1. Органолептична оцінка зразків протеїнового коктейлю

Джерело: розроблено авторами.

Органолептична оцінка показала, що контрольний зразок мав характерний чистий смак, притаманний КСБ, але був дещо водянистий. При внесенні порошку бузини в кількості 5 %, 10, % від маси сухої суміші, інтенсивність вираженого смаку наповнювача збільшується, смак стає гармонійним, з'являється солодкість, інтенсивність кольору збільшується пропорційно внесеному порошку, а при 15 % порошку смак набуває занадто вираженого присмаку бузини. Кількість наповнювача суттєво не впливає на структуру та консистенцію приготованого коктейлю, окрім того, що у всіх зразках в процесі зберігання (понад 30 хв) в стані спокою з'являється допустимий осад. Тому приготовані коктейлі рекомендується вживати протягом не більше 20 хвилин після приготування, або перед вживанням збовтувати. Для подальших досліджень було обрано експериментальний зразок № 2, за результатами органолептичних досліджень.

Результати дослідження фізико-хімічних показників контрольного та експериментального зразка № 2 наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Результати фізико-хімічних досліджень

Показник	Зразок	
	Контрольний	Експериментальний
Активна кислотність, рН	6,5±0,2	6,2±0,2
Густина, г/см ³	1,033	1,030
Розчинність	0,2	0,6
Умовна в'язкість, 100 мл/с	13±2	15±2

Джерело: розроблено авторами.

Оскільки суміш для приготування протеїнового коктейлю належить до продуктів тривалого зберігання, то для визначення впливу внесеного порошку на стабільність сухої суміші при зберіганні, у сухій суміші для приготування коктейлю визначали масову частку води та мікробіологічні показники. Сухі суміші зберігали в пакетах із комбінованих матеріалів зі зір-застібкою, при температурі 8...12 °C і відносній вологості (70±2) %, у темному місці.

Мікробіологічні показники дослідного зразка виготовленого за розробленою рецептурою № 2 досліджували протягом 90 діб (при температурі (10±2) °C, відносній вологості повітря (70±2) %). За нормативний показник було взято вимоги ДСТУ 2903:2005.

Відбір і дослідження проб здійснювали кожну 18-ту добу зберігання. Загальне бактеріальне обсіменіння, що характеризується кількістю мезофільних аеробних та факультативно анаеробних мікроорганізмів (КМАФАнМ) колонієутворюючих одиниць у грамі продукту (КУО/г) визначали чашковим методом, шляхом паралельного посіву 1 г досліджуваного зразка попередньо розбавленого в 9 мл стерильного фізіологічного розчину на щільному поживному середовищі та культивуванні посівів при (30±1) °C протягом 72 годин. Для приготування поживного середовища використовували агар поживний тм Фармактив. Бактерії групи кишкових паличок (БГКП) визначали методом посіву розбавленого зразка на чашки Петрі із середовищем Ендо. Дріжджі, плісняві гриби – визначали посівом на середовище Сабуро. У табл. 5 представлено отримані результати.

Таблиця 4 – Мікробіологічні показники сухої суміші для протеїнового коктейлю при зберіганні

Найменування показника/норма	Термін зберігання, діб	Показник у сухій суміші
КМАФАнМ, КУО/г (не більше ніж 5×10^4)	0	менше ніж 10
	18	$(1,5 \pm 0,2) \times 10$
	36	$(5,2 \pm 0,3) \times 10$
	54	$(8,3 \pm 0,2) \times 10$
	72	$(2,5 \pm 0,2) \times 10^2$
	90	$(3,5 \pm 0,3) \times 10^2$
БГКП (коліформи) / в 0,1 г не дозволено	1...90	не виявлено
Дріжджі, та плісняві гриби КУО / г, не більше ніж 5×10^2	1...90	$(2,5 \pm 0,5) \times 10$

Джерело: розроблено авторами.

Отримані результати підтверджують можливість тривалого зберігання виготовленої за представленою рецептурою суміші для приготування протеїнових коктейлів із підвищеною біологічною цінністю. Суміші проявили високий ступінь мікробіологічної стабільності під час зберігання, це доводить можливість практичної реалізації розробки за представленою рецептурою, за умовою дотримання безпечних умов виробництва і вимог до якості вхідної сировини. Якщо врахувати низький вміст води в продукті та вищезазначені мікробіологічні показники, то можна попередньо встановити термін зберігання сухої суміші для приготування протеїнового коктейлю в межах 90 діб, за умови відсутності розгерметизації упаковки.

Висновки. У роботі здійснено підбір раціональної сировини для протеїнового коктейлю, обґрунтовано її вплив на якісні показники та на терміни зберігання, розроблено експериментальну рецептуру. Надалі планується розширити різноманіття інгредієнтів, та розробити лінійку протеїнових коктейлів підвищеної біологічної цінності.

З огляду на популяризацію здорового способу життя, попит на аналогічні продукти буде підвищуватися і надалі. Потреби ринку протеїнових коктейлів стабільні, тому розробка рецептури та технології протеїнового напою підвищеної біологічної цінності за рахунок використання похідних натуральної сировини тваринного та рослинного походження актуальна.

Список використаних джерел

1. Стеценко, Н. (2023). Проблема дефіциту білку у харчуванні населення України та шляхи її вирішення. *Modern engineering and innovative technologies*, (28-01), 41–45. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-28-01-028>.
2. Desbrow B. (2021). Youth athlete development and nutrition. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 51(Suppl 1), 3–12. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01534-6>.
3. Притульська, Н. В., & Кошельник, А. В. (2017). Аналіз асортименту дієтичних добавок для відновлення спортсменів. У *Мережевий бізнес: становлення, проблеми, інновації* (с. 48–51).
4. Arenas-Jal, M., Suñé-Negre, J. M., Pérez-Lozano, P., & García-Montoya, E. (2019). Trends in the food and sports nutrition industry: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(14), 2405–2421. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1643287>.
5. Бузіян, В. І. (2018). Стан ринку спортивного харчування в Україні і за кордоном. *Збірник наукових праць молодих учених, аспірантів та студентів*, 193–195.
6. Коломосьць, А. В. (2024). Удосконалення технології йогурту функціонального призначення для спортивного харчування з екстрактом ялівцю та грейпфрутом. У *XI Всеукраїнська науково-технічна конференція здобувачів вищої освіти ТДАТУ. Факультет агротехнологій та екології* (с. 135). ТДАТУ. http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/17742/1/Collection%20theses%20of%20ATE_47-49.pdf.
7. Авдєєва, Л. Ю., Декуша, Г. В., Турчина, Т. Я., & Макаренко, А. А. (2024). Особливості складу гейнерів як актуального виду спортивного харчування. *Scientific Works*, 88(1), 43–49. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2958>.
8. Ткаченко, Н. А., & Свайкін, О. О. (2024). Моделювання рецептурного складу сухих білкових молочних продуктів для хлопців-спортсменів. *Scientific Works*, 87(2), 33–41. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i2.2828>.
9. Назаренко, Ю. В., & Яценко, С. (2016). Особливості використання молочної сироватки та ретентату, отримання високоякісних напоїв оздоровчого харчування. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*, (1(23)), 127–142. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/1107/1/Pt_2016_1_13.pdf.
10. Sá, A. G. A., Moreno, Y. M. F., & Carciofi, B. A. M. (2020). Plant proteins as high-quality nutritional source for human diet. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.011>.
11. Oshchypok, I. M., & Onyshko, L. Y. (2019). Enrichment of food raw materials with ingredients for the creation of healthy eating. *Herald of Lviv University of Trade and Economics. Technical sciences*, (22), 44–51. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2019-22-08>.
12. Самілик, М., Цирулик, Р., & Вороненко, Н. (2023). Застосування морквяних порошків для збагачення молочних продуктів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 13(2). <https://doi.org/10.31388/sbtsatu.v13i2.423>.
13. Horobets, A. O. (2019). Vitamins and microelements as specific regulators of physiological and metabolic processes in the body of children and adolescents. *Ukrainian Journal of Perinatology and Pediatrics*, (4(80)), 75–92. <https://doi.org/10.15574/pp.2019.80.75>.
14. Sychevskiy, M., Romanchuk, I., & Minorova, A. (2019). Milk whey processing: Prospects in Ukraine. *Food Science and Technology*, 13(4), 58–68. <https://doi.org/10.15673/fst.v13i4.1557>.
15. Królczyk, J., Dawidziuk, T., Janiszewska-Turak, E., & Sołowiej, B. (2016). Use of whey and whey preparations in the food industry – a review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 66(3), 157–165. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2015-0052>.
16. Smithers, G. W. (2015). Whey-ing up the options – Yesterday, today and tomorrow. *International Dairy Journal*, 48, 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2015.01.011>.

17. Сорокіна, С. В., Колесник, В. В., Полупан, В. В., Акмен, В. О., & Penkina, N. M. (2022). Використання нетрадиційної сировини під час виробництва слабоалкогольних напоїв. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, (5), 90–97. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.12>.
18. Самілик, М. М., Демидова, Є. В., & Болгова, Н. В. (2022). Безвідходна технологія переробки дикорослої сировини. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(3), 394–403. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i3.256924>.
19. Самілик, М. М., & Демидова, Є. В. (2022). Використання похідних продуктів переробки обліпихи у виробництві здобних булочок. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, (4), 94–101. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.4.12>.
20. Simonova, I., Halukh, B., Drachuk, U., & Basarab, I. (2023). Improvement of poultry meat marinated semi-finished product technology. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 25(99), 61–68. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9911>.
21. Deinychenko, L., & Lytvynenko, V. (2023). Study of the preconditions for the implementation of protein fortified products in the food of the population of Ukraine. *International Scientific Journal "Internauka"*, (1(135)), 10–15. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-1-8535>.
22. Самілик, М. М., Xuanxuan, Q., & Болгова, Н. В. (2022). Розширення асортименту кисломолочних напоїв з підвищеною біологічною цінністю. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 12(1), 1–11. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.3.18>.
23. Odintsov, S., Nazarenko, Y., Synenko, T., & Huba, S. (2024). Determining the influence of hemp seed protein on the quality indicators of cheese product and the content of nutrients in it. *Technology and Equipment of Food Production*, 2(11(128)), 6–12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300172>.
24. Петрова, О. І., Болгова, Н. В., Губа, С. О., Соколенко, В. В., & Доденко, А. В. (2023). Наукове обґрунтування використання насіння маку при виробництві сирків кисломолочних. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*, (3(49)), 51–57. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.8>.
25. Демидова, Є. В., & Самілик, М. М. (2022). Використання похідних переробки ягід бузини у виробництві кисломолочних продуктів. У *Інформаційне суспільство: Технологічні, економічні та технічні аспекти становлення* (с. 149–151). http://konferenciaonline.org.ua/data/downloads/file_1666209338.pdf#page=149.
26. Рижкова, Т. М., Самілик, М. М., Болгова, Н. В., Губа, С. О., & Соколенко, В. В. (2023). Удосконалення технології сиркових мас із використанням порошку калини. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*, (3 (49)), 69–74. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.10>.
27. Демидова, Є., & Самілик, М. (2023). Технологія макаронних виробів, збагачених продуктами переробки обліпихи. У *Оздоровчі харчові продукти та дієтичні добавки: технології, якість та безпека* (с. 97). НУХТ. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/db972322-384b-4179-8cae-c401bbabecf2/content#page=97>.

References

1. Stetsenko, N. (2023). Problema defitsytu bilku u kharchuvanni naseleння Ukrainy ta shliakhy yii vyrishennia [The problem of protein deficiency in the diet of the Ukrainian population and ways to solve it]. *Modern engineering and innovative technologies*, (28-01), 41–45. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-28-01-028>.
2. Desbrow B. (2021). Youth athlete development and nutrition. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 51(Suppl 1), 3–12. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01534-6>.
3. Prytulska N. V. & Koshelnik A. V. (2017). Analiz asortymentu diietychnykh dobavok dlia vidnovlennia sportsmeniv [Analysis of the assortment of dietary supplements for the recovery of athletes]. У *Merezhevyi biznes: stanovlennia, problemy, innovatsii – In Network business: formation, problems, innovations* (pp. 48–51).
4. Arenas-Jal, M., Suñé-Negre, J. M., Pérez-Lozano, P., & García-Montoya, E. (2019). Trends in the food and sports nutrition industry: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(14), 2405–2421. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1643287>

5. Buziiian, V.I. (2018). Stan rynku sportyvnoho kharchuvannia v Ukraini i za kordonom [The state of the sports nutrition market in Ukraine and abroad]. *Zbirnyk naukovykh prats molodykh uchenykh, aspirantiv ta studentiv – Collection of scientific works of young scientists, postgraduates and students*, 193–195.
6. Kolomoiets, A.V. (2024). Udoskonalennia tekhnolohii yohurtu funktsionalnogo pryznachennia dlia sportyvnoho kharchuvannia z ekstraktom yalivtsiu ta hreipfrutom [Improving the technology of functional yogurt for sports nutrition with juniper and grapefruit extract]. *U KhI Vseukrainska naukovo-tekhnichna konferentsiia здобувачів вищої освіти TDATU. Fakultet ahrotekhnolohii ta ekolohii – In the XI All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Higher Education Applicants of the Tavria State Agrotechnical University. Faculty of Agrotechnology and Ecology (p. 135)*. http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/17742/1/Collection%20theses%20of%20ATE_47-49.pdf
7. Avdieieva, L.Iu., Turchyna, T.Ia. (2024). *Osoblyvosti skladu heineriv yak aktualnogo vydu sportyvnoho kharchuvannia [Features of the composition of weight gainers as a current type of sports nutrition]*. *Scientific Works*, 88(1), 43–49. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2958>.
8. Tkachenko, N., & Cvaikin O. (2024). Modeliuvannia retsepturnoho skladu sukhlykh bilkovykh molochnykh produktiv dlia khloptsiv-sportsmeniv [Modeling of the recipe composition of dry protein dairy products for boys-athletes]. *Scientific Works*, 87(2), 33–41. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v87i2.2828>.
9. Nazarenko Yu.V. & Yashchenko S.Iu. (2016). Osoblyvosti vykorystannia molochnoi syrovatky ta retentatu, otrymannia vysokoikisnykh napoiv ozdorovchoho kharchuvannia [The peculiarities of using whey and retentate, obtaining of high-quality health beverage]. *Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli-Advanced equipment and technologies for food production in the restaurant industry and trade*, (1(23)), 127–142. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/1107/1/Pt_2016_1_13.pdf.
10. Sá, A G.A., Moreno, Y.M. F., & Carciofi, B.A. M. (2020). Plant proteins as high-quality nutritional source for human diet. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.01.011>.
11. Oshchypok, I.M., & Onyshko, L. Y. (2019). Enrichment of food raw materials with ingredients for the creation of healthy eating. *Herald of Lviv University of Trade and Economics. Technical sciences*, (22), 44–51. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2019-22-08>.
12. Samilyk, M., Tsyruyk, R., & Voronenko, N. (2023). Zastosuvannia morkvianykh poroshkiv dlia zbahachennia molochnykh produktiv [Application of carrot powders for dairy products enrichment]. *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu – Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*, 13(2). <https://doi.org/10.31388/sbtsatu.v13i2.423>.
13. Horobets, A.O. (2019). Vitamins and microelements as specific regulators of physiological and metabolic processes in the body of children and adolescents. *Ukrainian Journal of Perinatology and Pediatrics*, (4(80)), 75–92. <https://doi.org/10.15574/pp.2019.80.75>
14. Sychevskiy, M., Romanchuk, I., & Minorova, A. (2019). Milk whey processing: Prospects in Ukraine. *Food Science and Technology*, 13(4), 58–68. <https://doi.org/10.15673/fst.v13i4.1557>.
15. Królczyk, J., Dawidziuk, T., Janiszewska-Turak, E., & Sołowiej, B. (2016). Use of whey and whey preparations in the food industry – a Review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 66(3), 157–165. <https://doi.org/10.1515/pjfn-2015-0052>.
16. Smithers, G. W. (2015). Whey-ing up the options – Yesterday, today and tomorrow. *International Dairy Journal*, 48, 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2015.01.011>.
17. Sorokina, S.V., Kolesnyk, V.V., Polupan, V.V., Akmen, V. O., & Penkina, N.M. (2022). Vykorystannia netradytsiinoi syrovyny pid chas vyrobnytstva slaboalkoholnykh napoiv [Use of non-traditional raw materials in the production of low-alcohol beverages]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky – Taurida Scientific Herald. Series: Technical Sciences. Series: Technical Sciences*, (5), 90–97. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.12>
18. Samilyk, M.M., Demidova, E.V., & Bolgova, N.V. (2022). Bezvidkhodna tekhnolohiia pererobky dykorusloi syrovyny [Waste-free technology of processing wild plant raw materials]. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(3), 394–403. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i3.256924>.

19. Samilyk, M.M., & Demydova, Ye.V. (2022). Vykorystannia pokhidnykh produktiv pererobky oblipykhy u vyrobnytstvi zdobnykh bulochok [The use of derivative products of the processing of sea – buckthorn in the manufacture of buns]. *Tavriyskyi naukovyi visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky – Taurida Scientific Herald. Series: Technical Sciences*, (4), 94-101. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.4.12>.
20. Simonova, I., Halukh, B., Drachuk, U., & Basarab, I. (2023). Improvement of poultry meat marinated semi-finished product technology. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 25(99), 61-68. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9911>.
21. Deinychenko, L., & Lytvynenko, V. (2023). Study of the preconditions for the implementation of protein fortified products in the food of the population of Ukraine. *International Scientific Journal “Internauka”*, (1(135)), 10-15. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-1-8535>.
22. Samilyk M.M. Tsyn Siuansuan, & Bolhova N.V. (2022) Rozshyrennia asortymentu kyslomolochnykh napoiv z pidvyshchenoiu biolohichnoiu tsinnistiu [Expanding the range of fermented dairy drinks with increased biological value]. *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu – Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*, 12(1), 1-11. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.3.18>.
23. Odintsov, S., Nazarenko, Y., Synenko, T., & Huba, S. (2024). Determining the influence of hemp seed protein on the quality indicators of cheese product and the content of nutrients in it. *Technology and Equipment of Food Production*, 2(11(128)), 6–12. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300172>.
24. Petrova O. I., Bolhova N. V., Huba S. O., Sokolenko V. V., Dodenko A. V. (2022). Naukove obgruntuvannia vykorystannia nasinnia maku pry vyrobnytstvi syrkiv kyslomolochnykh [Scientific rationale for the use of poppy seeds in the production of curd products]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrrarnoho universytetu. Seriya: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv – Bulletin of the Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (3 (49)), 51–57. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.8>.
25. Demydova, Ye.V., & Samilyk, M.M. (2022). Vykorystannia pokhidnykh pererobky yahid buzyny u vyrobnytstvi kyslomolochnykh produktiv [Use of elderberry processing derivatives in the production of fermented milk products]. *U Informatsiine suspilstvo: Tekhnolohichni, ekonomichni ta tekhnichni aspekty stanovlennia – Informational Society: Technological, economic and technical aspects of formation* (p. 149-151). http://konferenciaonline.org.ua/data/downloads/file_1666209338.pdf#page=149.
26. Ryzhkova, T.M., Samilyk, M.M., Bolhova, N.V., Huba, S.O., Sokolenko, V.V. (2022) Udoshkonalennia tekhnolohii syrkovykh mas iz vykorystanniam poroshku kalyny [Improvement of the technology of curd masses using viburnum powder]. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes – Bulletin of the Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (3(49)), 69–74. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.10>.
27. Demydova, Ye., & Samilyk, M. (2023). Tekhnolohiia makaronnykh vyrobiv, zbahachenykh produktamy pererobky oblipykhy [Technology of pasta enriched with sea buckthorn processing products]. *U Ozdorovchi kharchovi produkty ta diietychni dobavky: tekhnolohii, yakist ta bezpeka NUKhT – In Wellness Food Products and Dietary Supplements: Technology, Quality and Safety. National University of Food Technologies* (pp. 97). <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/db972322-384b-4179-8cae-c401bbabecf2/content#page=97>.

Отримано: 27.01.2025

Svitlana Huba¹, Nataliia Bolhova², Yevheniia Demydova³, Oleksandr Huba⁴

¹Senior Lecturer the Department of Food Technology and Safety
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)

E-mail: s.huba@snau.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0546-7940>

ResearcherID: [V-7182-2018](https://orcid.org/0000-0002-0546-7940) **Scopus ID:** [59149322100](https://orcid.org/0000-0002-0546-7940)

²PhD in Agricultural Sciences, Associate professor the Department of Food Technology and Safety
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)

E-mail: natalia.bolhova@snau.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0201-0769>

ResearcherID: [V-8442-2018](https://orcid.org/0000-0002-0201-0769), **Scopus ID:** [57217302672](https://orcid.org/0000-0002-0201-0769)

³Assistant the Department of Food Technology and Safety
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)

E-mail: yevheniia.demydova@snau.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7933-4251>

ResearcherID: [HMO-7329-2023](https://orcid.org/0000-0002-7933-4251), **Scopus ID:** [57685858000](https://orcid.org/0000-0002-7933-4251)

⁴Master's Student of the Faculty of Food Technologies
Sumy National Agrarian University (Sumy, Ukraine)

E-mail: hubaalex@ukr.net, **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-0574-1205>

**DEVELOPMENT OF THE RECIPE FOR PROTEIN COCKTAIL
WITH INCREASED BIOLOGICAL VALUE**

Promotion of healthy lifestyle is gaining momentum in Ukraine. A healthy lifestyle is not only physical activity, it is also a way of nutrition and diet. Nutrition of significant part of the population of Ukraine is deficient in animal proteins, vitamins, and some minerals. This deficit can be compensated for by enriching diets of people who have much physical activity with protein cocktails containing certain biologically active substances. Results of the presented research can be implemented in the food industry, in production of combined protein products of functional and special purpose.

Whey protein concentrate is often used as a source of biologically valuable proteins, as protein supplement when eating meat-free diets, or as a supplement to the diet of people who have high physical activity. Assortment of these products is limited. The topic needs to be studied because there are no researches that describe the scientifically based approach to the use of derivatives of processing wild berries in products intended for people with high physical activity. The protein cocktails market has stable needs, therefore expansion of the assortment may be promising, due to use of derivatives of natural plant raw materials, with the content of valuable vitamins and minerals.

The main goal of the research is to develop the recipe for protein cocktail mixture with increased biological value, which is achieved by enriching secondary dairy products with ingredients that carry biologically valuable components, including vitamins, minerals, and dietary fiber.

The main objectives of the study are to select and justify types of main and additional raw materials for the designed product, develop draft recipes, and study organoleptic, physicochemical, and microbiological indicators.

As a result of the research, rational selection of raw materials for the protein cocktail was carried out, justification of its impact on quality indicators and shelf life was made, and experimental recipe was developed. In the future, it is planned to expand the variety of ingredients, and to develop the line of protein cocktails with increased biological value.

Keywords: whey protein concentrate; protein cocktails; elderberry powder; nutritional value; diet; nutrition; physicochemical studies; microbiological stability.

Table: 4. Fig.: 1. References: 27.

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2025-1(39)-266-277

УДК 631.937.33

Юрій Олександрович Денисов¹, Сергій Вікторович Єрмолов²

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки»

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: den711td@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2293-7964>.

ResearcherID: G-1144-2016. Scopus Author ID: 56338219200

²аспірант кафедри «Електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій»

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: sergey.ermolow@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8786-2430>.

ResearcherID: MBI-0037-2025

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПУ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Швидке зростання механізації всіх сільськогосподарських робіт не може повністю зменшити участь людини, тому автоматизація сільського господарства є надзвичайно важливою. З погляду автоматизації це дослідження підкреслює вирішальну роль БПЛА в точному та розумному сільському господарстві. БПЛА можуть надавати чітке зображення з високою роздільною здатністю для використання в комерційних цілях, таких як сільське господарство. У статті вперше систематизовано ефективність використання БПЛА з додатковим обладнанням та оцінено доцільність їх застосування на дроні саме для потреб землеробства. Проаналізовано можливі способи підвищення ефективності застосування БПЛА при їх комбінуванні з додатковими датчиками та сенсорами. Вказано, що саме приводить до підвищення ефективності в польових умовах у порівнянні з існуючими аналогами.

Ключові слова: штучний інтелект; аграрний сектор; БПЛА; додавання датчиків та сенсорів; моніторинг посівів; розумне землеробство; інтернет речей, системи живлення.

Рис.: 3. Бібл.: 28.

Актуальність теми дослідження. Технологічний прогрес має глибокий вплив на суспільства, економіку та життя людей. Ці трансформації можна візуалізувати за допомогою технологічного прогресу. Безпілотні літальні апарати (БПЛА), також відомі як дистанційно керовані літальні апарати, є яскравим прикладом візуалізації змін БПЛА не потребують пілота і можуть керуватися автономно або дистанційно БПЛА є невід'ємною частиною безпілотних авіаційних систем, включаючи засоби зв'язку і наземні станції управління БПЛА [1–6].

За даними AUVSI, в офіційному звіті Міжнародної асоціації безпілотних транспортних систем (Association for Unmanned Vehicle Systems) під назвою «The Economic Impact of Unmanned Systems Integration in the United States» (Економічний вплив інтеграції безпілотних транспортних систем у США) зазначено, що використання БПЛА в сільському господарстві має перевагу над усіма іншими видами використання. Зауважено, що приблизно 80 % ринку БПЛА займе сільське господарство США до 2027 року [15].

За умови державної підтримки Україна може зайняти 5–10 % (базовий сценарій) та 15–18 % (оптимістичний сценарій) світового ринку в сільському господарстві до 2040 року. У вартісному вираженні український ринок послуг на основі БПЛА в аграрному секторі, який займають компанії Drone UA та UkrSpec_Systems, може сягнути 600 000 мільйонів гривень, а продажі БПЛА могли б суттєво підтримати український бюджет у вигляді фінансових кредитів.

Постановка проблеми. БПЛА можуть надавати чіткі зображення з високою роздільною здатністю для комерційного використання, наприклад, у сільському господарстві. Пізніше, з появою та інтеграцією сучасних навігаційних датчиків, БПЛА стали невід'єм-

ною частиною збройних сил. Розвиток технології не лише зняв обмеження на використання БПЛА у військових цілях, але й відкрив їхні крила для комерційних цілей, пов'язаних із сільським господарством, дослідженнями, рекреацією, доставкою товарів і фотограмметрією. Однак на сьогодні сфери, у яких багатороторні БПЛА можуть бути використані для сільськогосподарських потреб, недостатньо досліджені [10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітчизняними та зарубіжними авторами проведено низку наукових досліджень щодо використання БПЛА в сільському господарстві. Серед найбільш відомих учених можна назвати таких, як С. Бурлака [1], S. A. Nahiyoan [18], F. Endara [12], R. Tyagi [26]. В опублікованих дослідженнях наведено системний аналіз використання різних моделей БПЛА для аерофотозйомки територій з метою картографування. Однак нині ще не визначено повний перелік завдань, які можна виконувати за допомогою БПЛА, особливо в сільському господарстві (фермерстві); використання БПЛА в сільському господарстві є новинкою для України, оскільки БПЛА в основному використовуються у військових цілях, і лише після військових випробувань вони почали широко застосовуватися в сільському господарстві. Використання БПЛА в сільському господарстві є новинкою для України [7–11; 28].

Мета дослідження полягає в аналізі шляхів підвищення ефективності БПЛА мультироторного типу в сільському господарстві.

Виклад основного матеріалу. До основних систем БПЛА належать (рис. 1):

1. Силові установки (двигуни). Залежно від типу силової установки БПЛА можна розділити на ті, що приводяться в рух електродвигунами та двигунами внутрішнього згоряння. Однією з основних переваг рідинних (бензинових, водневих) двигунів (поршневих, роторних, газотурбінних, реактивних) є їхня здатність виконувати завдання протягом 8–10 годин роботи літального апарату без дозаправки. [12–14].

2. Комп'ютерна система управління. Системою управління БПЛА керує бортовий комп'ютер. У наш час використовуються відкриті операційні системи, такі як Linux, або сучасні пропріетарні операційні системи реального часу, такі як QNX, VME, VxWorks і XOberon.

3. Система телеметричного зв'язку, в якій для зв'язку з БПЛА і високошвидкісної передачі даних на наземний центр управління використовується командна радіолінія. Переважно вона організована на ультракоротких хвилях 200–400 МГц, L (1–2 ГГц), S (2–4 ГГц), C (3,4–8 ГГц) і X (7–10,7 МГц) у діапазонах прямої видимості. Надлегкі, компактні, прості БПЛА використовуються в мережах мобільних операторів (покоління 2G, 780–960, 925–960 МГц або 1,7–2,2, 2,5–2,7 ГГц), Wi-Fi (2,4–2,5, 5,15–5,35, 5,65–6,425 ГГц), WiMAXMobile (2,3–13,5 ГГц) і LTE (0,79–0,87, 1,7–1,8 і 2,5–2,7 ГГц).

4. Навігаційні системи. Навігаційні системи, що використовуються більшістю БПЛА, є супутниковими радіонавігаційними системами. Найпоширенішими з них є GPS / NAVSTAR (США), Beidou (BDS) / GNSS (Китай), Galileo (ЄС), DORIS (Франція), QZSS (Японія) та IRNSS (Індія). Сигнали супутникових радіонавігаційних систем генеруються в діапазоні частот 1,1–1,6 ГГц [16–19].

Додатковим способом підвищення автономності та точності навігаційних систем БПЛА є встановлення барометра та лазерного висотоміра. Цей пристрій дозволяє забезпечити вищу точність визначення координат за рахунок використання додаткових каналів об'єднання навігаційних даних, а також використання електронних топографічних карт з барометричними даними і висотними профілями для створення автоматичного профілю польоту БПЛА [21].

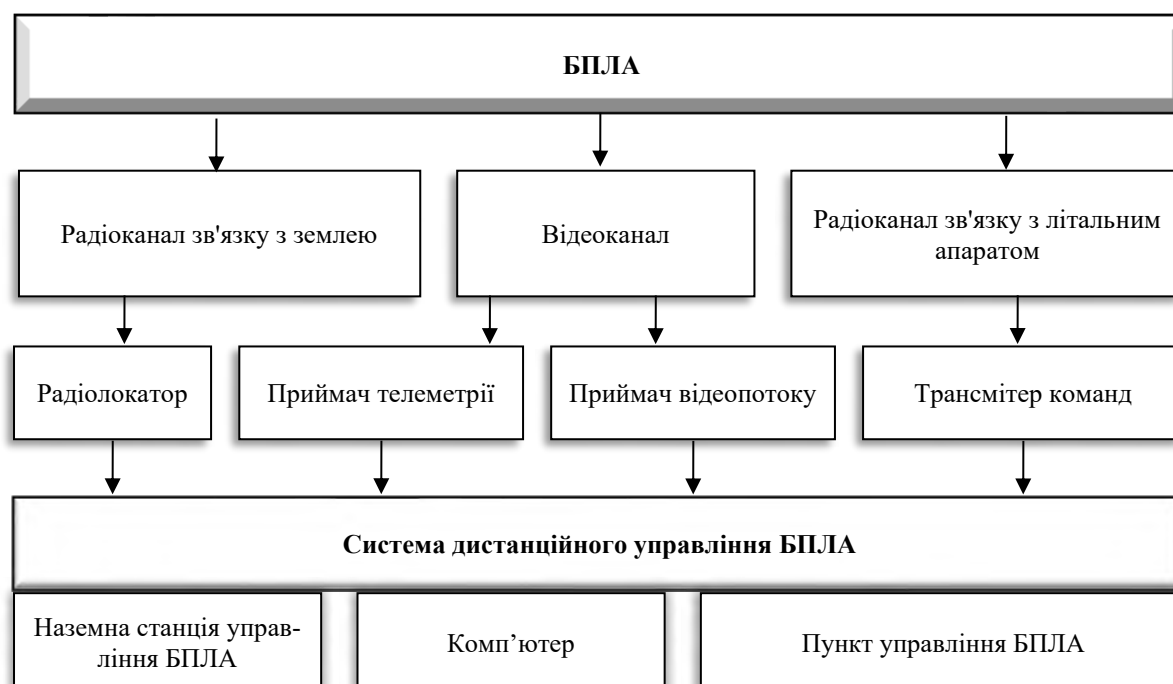


Рис. 1. Основні складові компоненти сучасних систем БПЛА

Джерело: розроблено авторами.

Залежно від переліку завдань, БПЛА можуть оснащуватися наступними системами та пристроями (табл. 1): – розвідувальними системами (фотоелектронної, тепловізійної, радіолокаційної, радіотехнічної, радіологічної, хімічної, бактеріологічної та інших видів розвідки); – засобами радіоелектронної боротьби або постановки радіоелектронних перешкод; – апаратурою наведення та корекції керованої зброї; – автопілотним та посадочним обладнанням; – транспортними касетами, відсіками, кріпленнями та ін.

Сучасні технології в сільському господарстві є ключем до вдосконалення виробничих процесів та підвищення продуктивності. До них відносяться автоматизація, Інтернет речей (IoT), БПЛА та аналітика даних. Автоматизація замінює ручні робочі процеси автоматизованими системами для підвищення швидкості та ефективності; IoT дозволяє збирати дані та обмінюватися ними між сільськогосподарськими пристроями, датчиками та обладнанням, що полегшує моніторинг росту рослин. Основною метою точного землеробства є використання оптимальної кількості ресурсів у потрібний час і в потрібному місці для виробництва продукції кращої якості [20].

Найбільш поширеними сферами застосування БПЛА у сільському господарстві є збір даних і картографування змін на сільськогосподарських угіддях, аналіз даних, прийняття рішень щодо управління ресурсами на основі результатів аналізу, а також менш поширені застосування, такі як внесення пестицидів і забезпечення зручності. Сільськогосподарська галузь широко використовує традиційні технології дистанційного зондування на основі супутників і повітряних платформ. Потенційні супутники для картографування та моніторингу рослинності базуються на просторовій, часовій та просторово-часовій роздільній здатності бортових датчиків, таких як MODIS, OLI та AVHRR [27].

Таблиця 1 – Основні можливості БПЛА в сільському господарстві, що оснащені додатковим обладнанням

Тип додаткового обладнання	Ключові показники	Застосування в сільському господарстві	Продуктивність БПЛА з додатковим обладнанням	Обмеження
Камера RGB	Роздільна здатність і частота кадрів	Моніторинг росту культур і виявлення хвороб	Вища роздільна здатність забезпечує детальні зображення та покращує завдання класифікації зображень (наприклад, визначення моделей поширення хвороби)	Обмежений спектральний діапазон не може вловити вміст хлорофілу або ледь помітні зміни здоров'я врожаю
Мультиспектральний сенсор	Спектральний діапазон (від видимого до ближнього інфрачервоного) і NDVI	Моніторинг стану рослинності та виявлення бур'янів	Дозволяє розраховувати вегетаційні індекси, такі як NDVI, і покращує прогнози моделей штучного інтелекту щодо здоров'я та сили рослин	Чутливий до атмосферних умов (наприклад, хмарності та інтенсивності світла)
Гіперспектральний датчик	Спектральна роздільна здатність і обсяг даних	Моніторинг поживних речовин і виявлення захворювань	Вища спектральна роздільна здатність покращує точність виявлення дефіциту поживних речовин і захворювань культур і має вирішальне значення для детальної класифікації AI / ML	Створює великі набори даних, які можуть уповільнити обробку моделі штучного інтелекту / ML і є дорогим для розгортання
Теплова камера	Температурна чутливість і просторова роздільна здатність	Управління зрошенням і виявлення нестачі води	Надає точні термічні дані та дозволяє моделям ШІ оптимізувати зрошення шляхом раннього виявлення нестачі води в культурах	Нижча просторова роздільна здатність і менш ефективний для дрібних деталей поля порівняно з RGB
LIDAR	Щільність і діапазон точок	Топографічне картографування та оцінка біомаси	Створює точні 3D-моделі рельєфу та біомаси та покращує прогнозування врожайності на основі ШІ та точність карт рельєфу	Обмежене використання в місцях з густою рослинністю
Радар із синтезованою апертурою (SAR)	Глибина проникнення і роздільна здатність	Моніторинг вологості ґрунту	Корисно для будь-якої погоди та освітлення	Вимагає високих технічних знань для точної інтерпретації

Джерело: розроблено авторами.

Одним з основних застосувань БПЛА в сільському господарстві є моніторинг посівів (рис. 2). Завдяки спеціалізованим камерам і датчикам, встановленим на літальному апараті, можна отримувати зображення полів з високою роздільною здатністю. Це дає змогу отримати детальні зображення, які можна використовувати для аналізу густоти посівів, виявлення хвороб і шкідників та оцінки стану рослинності [24]. Зібрані дані можуть допомогти фермерам робити об'єктивні оцінки та ухвалювати своєчасні рішення щодо впровадження заходів зі зрошення, внесення добрив та захисту рослин.

Використання БПЛА в поєднанні з мультиспектральними й тепловими датчиками дозволяє, наприклад, визначити просторову протяжність вимірювань рівня води на комерційних виноградниках у вологих районах. Використання безпілотних літальних апаратів принесло користь багатьом застосуванням дистанційного зондування. У багатьох випадках це пов'язано з вартістю, необхідністю швидкого реагування або необхідністю проведення спостережень в умовах, які є шкідливими або небезпечними для екіпажу [22].

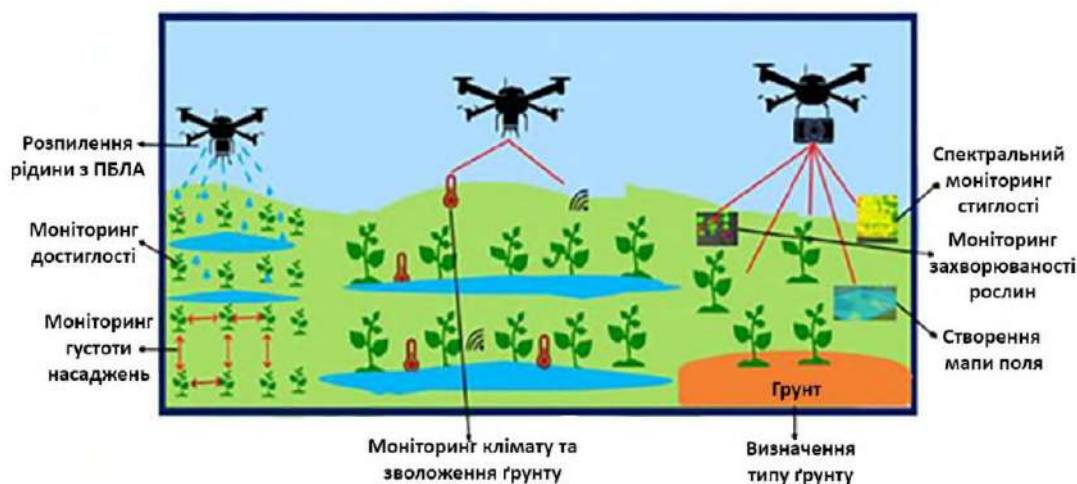


Рис. 2. Основні області застосування БПЛА в сільському господарстві: обприскування, моніторинг, аналіз обґрунтування, картографування полів

Джерело: розроблено авторами.

Перевагами використання БПЛА в сільському господарстві є автоматизація та ефективність: оскільки БПЛА можуть виконувати автоматизовані завдання без втручання людини, зменшується ручна праця і підвищується продуктивність: БПЛА оснащені сучасними датчиками та навігаційними системами, які дозволяють їм точно картографувати поля, моніторити посіви та вносити речовини на окремі ділянки поля. Зниження витрат, зменшення впливу на навколишнє середовище, віддалений моніторинг, швидкість і продуктивність, підвищення точності обробки, доступ до важкодоступних ділянок, інтеграція з технологіями Інтернету речей (IoT) [23].

Недоліки використання БПЛА в сільському господарстві такі: висока вартість: налаштування та обслуговування системи БПЛА є досить дорогим; витрати на придбання та утримання БПЛА є значним тягарем, особливо для малого аграрного бізнесу. БПЛА Yamaha коштують близько 2,5 млн грн, а Agrus – близько 385 000 грн, але їхня ефективність значно нижча. Технічні проблеми: БПЛА – це складні технічні системи, які можуть потребувати постійного технічного обслуговування та ремонту. Несправності обладнання можуть вплинути на продуктивність та ефективність. Обмежена гнучкість: БПЛА часто запрограмовані на виконання конкретних завдань і можуть бути менш гнучкими, ніж людська праця. Вони можуть мати труднощі з адаптацією до мінливих або незвичних умов у польових умовах.

Безпека і конфіденційність: Використання БПЛА порушує питання безпеки та конфіденційності даних: Існує ризик несанкціонованого доступу до систем БПЛА та перехоплення даних, що може мати негативний вплив на сільськогосподарську діяльність. Соціальні аспекти: Використання БПЛА в сільському господарстві може призвести до скорочення робочих місць, особливо для тих, хто займається фізичною працею в сільському господарстві. Це може вплинути на соціально-економічну ситуацію в сільській місцевості та вимагати перекваліфікації робочої сили [25].

Вразливість до технічних збоїв: системи БПЛА схильні до ризику технічних збоїв і хакерських вторгнень.

Вимоги до інфраструктури: Ефективне використання БПЛА може вимагати подальших змін в інфраструктурі, таких як спеціалізовані посадкові майданчики та зарядні станції.

Інновації та навчання: Застосування БПЛА вимагає технічних знань і навичок в аграрному секторі. Враховуючи ці переваги та недоліки, використання систем БПЛА в сільському господарстві має бути ретельно збалансованим і враховувати конкретні потреби та умови кожного сільськогосподарського підприємства [26].

Ефективність використання БПЛА в сільському господарстві залежить від багатьох факторів, і кожне господарство має проаналізувати власні умови та потреби, щоб визначити найкращий спосіб використання цих технологій. Найефективнішим способом збільшення використання БПЛА в сільському господарстві є розробка БПЛА з новими можливостями, що вимагає вдосконалення сенсорної бази. Додавання нових датчиків, які надають більш точну інформацію про стан посівів, дозволить фермерам контролювати і підтримувати свої посіви максимально ефективно (табл. 2).

Таблиця 2 – Підвищення активності БПЛА при використанні нових датчиків

Аграрна задача для БПЛА	Використаний датчик БПЛА	Проблеми ШІ	Висота	Витривалість	Режим польоту
Оцінка площі	RGB, мультиспектральний і гіперспектральний	Класифікація	100–500 м	1–3 год	Автономний
Ґрунтові умови	Мультиспектральний, гіперспектральний і термічний	Регресія	50–200 м	20–40 хв	Ручний / автономний
Параметри культури	RGB, мультиспектральний, гіперспектральний та LIDAR	Регресія і класифікація	50–400 м	1–4 год	Автономний
Хвороби сільськогосподарських культур	RGB, мультиспектральний і гіперспектральний	Регресія і класифікація	50–300 м	2–5 год	Ручний / автономний
Шкідники сільськогосподарських культур	RGB, мультиспектральний і гіперспектральний	Виявлення та класифікація об'єктів	20–100 м	20–60 хв	Повністю автономний
Водний стрес культур	RGB, мультиспектральний і теплові	Індексний аналіз та регресія	50–500 м	1–3 год	Автономний
Бур'яни	RGB, мультиспектральний і гіперспектральний	Класифікація та виявлення об'єктів	50–200 м	1–2 год	Автономний
Прогноз врожайності	RGB, мультиспектральна та стереокамера	Регресія та виявлення об'єктів	100–400 м	1–3 год	Повністю автономний
Рішення про збирання врожаю	RGB, мультиспектральний і гіперспектральний	Регресія та виявлення об'єктів	50–300 м	2–5 год	Ручний / автономний
Планування зрошення	RGB і теплові	Індексний аналіз і регресія	50–150 м	20–60 хв	Автономний
Моніторинг поживних речовин	Гіперспектральний і багатоспектральний	Класифікація та регресія	100–500 м	1–3 год	Автономний
Стадія росту культури	RGB і мультиспектральний	Класифікація та виявлення об'єктів	50–200 м	1–2 год	Повністю автономний
Післязбиральний моніторинг	RGB, мультиспектральний і гіперспектральний	Регресія і класифікація	50–300 м	1–4 год	Автономний
Раннє виявлення захворювання	Теплові, гіперспектральні та RGB	Виявлення та класифікація об'єктів	50–400 м	1–3 год	Ручний / автономний

Джерело: розроблено авторами.

Крім того, важливим елементом є розробка нових систем управління для БПЛА (табл. 3). За допомогою нових алгоритмів і програмного забезпечення, БПЛА можуть стати більш ефективними у виконанні різних завдань, включаючи точне розпилення добрив, полив та виявлення патогенів рослин.

Таблиця 3 – Підвищення ефективності БПЛА за рахунок використання нових алгоритмів

Оснащення БПЛА	Автоматизована платформа	Використаний алгоритм	Переваги	Недоліки вдосконалення
БПЛА використовується для швидкої та точної класифікації рослин	БПЛА з датчиками RGB	CNN і випадковий ліс	Висока точність з датчиками RGB	Високі обчислювальні вимоги, виклики обробки в реальному часі
Покращений аналіз росту рослин за допомогою БПЛА та ML	БПЛА з мультиспектральними сенсорами	Глибоке навчання та SVM	Вища точність з мультиспектральними датчиками	Чутливий до змін освітлення
Системи LIDAR	БПЛА з камерами LIDAR і інфрачервоного діапазону (NIR).	Дерева рішень SVM	Швидкий час обробки	Складність калібрування може обмежувати точність
Точне виявлення захворювання на ранніх стадіях	БПЛА з гіперспектральними камерами	YOLO і CNN	Висока точність моніторингу захворювання	Шум навколишнього середовища та зміни температури можуть вплинути на точність
Виявлення захворювання на ранній стадії за допомогою БПЛА та ML	БПЛА з RGB і мультиспектральними сенсорами	SVM	Надійний результат F1 (85 %)	Фактори навколишнього середовища (наприклад, погода) можуть впливати на виявлення
Точне виявлення бур'янів за допомогою гіперспектрального зображення	БПЛА з гіперспектральним зображенням	Найближчий сусід і дерева рішень	Точна ідентифікація бур'янів	Проблеми навколишнього середовища та освітлення
Високоточне виявлення бур'янів за допомогою ML	БПЛА з мультиспектральними камерами	Випадковий ліс SVM	Висока точність виявлення (91 %)	Для оптимальної роботи потрібне рівномірне освітлення

Примітка: RGB (Red, Green, Blue - червоний, зелений, синій) - адитивна кольорова модель, що описує спосіб синтезу кольору; SVM – метод опорних векторів; CNN - convolutional neural network, згортокна нейронна мережа; ML - Machine Learning, машинне навчання

Джерело: розроблено авторами.

Розробка нових методів може включати інтеграцію БПЛА з іншими передовими технологіями, такими як супутникова навігація, штучний інтелект, сенсорні мережі та пристрої Інтернету речей. Така інтеграція створює можливості для розширення можливостей і потенціалу БПЛА, дозволяючи їм працювати в більш складних і різноманітних умовах. Для вирішення цієї проблеми використовуються наступні підходи: управління батареями для забезпечення адекватної зарядки і відповідного графіка заміни батарей [24].

Мінімізація розрядження акумуляторів БПЛА полягає в тому, щоб передбачити автоматичне перемикавання на зовнішнє живлення в процесі заміни без зупинки роботи БПЛА (рис. 3, а). Одним із можливих шляхів вирішення цієї проблеми є бездротова зарядка – це нова ідея в зарядці акумуляторів БПЛА. Наразі цікавою є можливість заряджати БПЛА безпосередньо від ліній електропередач вздовж траєкторії польоту БПЛА. Для цього використовуються методи, засновані на магнітному резонансі.

Сонячна енергія. Цей варіант ідеальний, оскільки БПЛА часто потрібно перебувати на великій висоті протягом тривалого часу. БПЛА використовують сонячну енергію вдень, але стаціонарні батареї можуть використовуватися додатково вночі або в поганих погодних умовах. Передові технології сонячних панелей, довший час польоту на великій відстані, економічна ефективність та екологічно чистий дизайн роблять БПЛА на сонячних батареях привабливим варіантом (рис. 3, б). На БПЛА встановлюється гіперспектра-

льна камера Gamma 3, із сенсором у діапазоні 400-1000 нанометрів. Номінальна потужність фотоелементів – 90-100 Вт, тип панелі — монокристал кремнію; розмір панелей - 100×100 мм. Додаткове живлення БПЛА - Li батареї.

*а**б*

Рис. 3. Зовнішній вигляд БПЛА з автоматичним перемиканням на зовнішнє живлення (а) та БПЛА на сонячних батареях (б)

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Розглянуто доцільність застосування БПЛА для потреб сільського господарства в порівнянні із їх застосуванням у зарубіжній практиці. Наведено основні комплектації БПЛА згідно їх практичного використання в польових умовах. Систематизовано можливості облаштування БПЛА додатковим обладнанням та оцінено доцільність їх застосування. Названо оптимальні способи підвищення ефективності застосування БПЛА при їх комбінуванні з додатковими датчиками та сенсорами. Вказано, що саме приводить до підвищення ефективності в польових умовах в порівнянні з існуючими аналогами.

Перспектива подальших досліджень. Ефективність застосування БПЛА в сільському господарстві – величезна. За допомогою «хмарних» засобів обробки даних з дронів і малої безпілотної авіації фермери відстежують не тільки сходи рослин, але і можуть спостерігати за відхиленням техніки від заданого курсу польових робіт, не виходячи з офісу. Одним із перспективних напрямків є розробка інтелектуальних систем управління БПЛА. Такі системи дозволять БПЛА самостійно приймати рішення про виконання завдань, що підвищить їх енергоефективність, автономність конкурентоспроможність.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів.

Під час написання наукової статті в деяких випадках був використаний штучний інтелект (GPT-4). ШІ дозволяє швидше знайти потрібну інформацію, яка була перевірена та вказана в списку використаних джерел.

Список використаних джерел

1. Бурлака, С., & Далека, А. (2024). Технології БПЛА для сільського господарства. *Вісник Хмельницького Національного Університету. Технічні науки*, 339(4), 259–264. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-41>.
2. Родінков, Ю., & Савицький, А. (2024). Математична модель керування безпілотних літальних апаратів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 337 (3(2), 298–304. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-45>.
3. Станкевич, С. В. (2022). Агродрони – майбутє сільського господарства. *II Всеукраїнська науково-практична конференція «Ефективність агротехнологій Житомирщини»* (с. 80–81). 17-18 листопада 2022 р., Житомир, ЖАТФК, 2022.
4. Ahmad, A., Saraswat, D., & Gamal, A. E. (2022). A survey on using deep learning techniques for plant disease diagnosis and recommendations for development of appropriate tools. *Smart Agricultural Technology*, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100083>.

5. Agrawal, J., & Arafat, M. Y. (2024). Transforming farming: A review of ai-powered UAV technologies in precision agriculture. *Drones*, 8(11), 664. <https://doi.org/10.3390/drones8110664>.
6. Anushi, Jain, S., Bhujel, S., Shrivastava, U., Rishabh, Mohapatra, A., Rimpika, & Mishra, G. (2023). Advancements in Drone Technology for Fruit Crop Management: A Comprehensive Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 4367–4378. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113617>.
7. Borikar, GP, Gharat, C, Deshmukh, SR. (2022). Application of drone systems for spraying pesticides in advanced agriculture: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1259, 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1259/1/012015>.
8. Canicatti, M., & Vallone, M. (2024). Drones in vegetable crops: A systematic literature review. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100396. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100396>.
9. Crusiol, L. G. T., Sun, L., Sun, Z., Chen, R., Wu, Y., Ma, J., & Song, C. (2022). In-Season monitoring of maize leaf water content using ground-based and uav-based hyperspectral data. *Sustainability*, 14(15), 9039. <https://doi.org/10.3390/su14159039>.
10. Dandrifosse, S., Jago, A., Huart, J. P., Michaud, V., Planchon, V., & Rosillon, D. (2024). Automatic quality control of weather data for timely decisions in agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100445>.
11. Ganesh Kumar, S. S., & Gudipalli, A. (2024). A comprehensive review on payloads of unmanned aerial vehicle. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 27(4), 637–644. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2024.08.001>.
12. Endara, F., Pérez, C., Rodriguez, J., Ortiz-Villalba, D., & Llanos, J. (2021). Analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) based on solar energy. In: *Recent advances in electrical engineering, electronics and energy: proceedings of the CIT 2020*, 288–99. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72212-8_21.
13. Islam, M. R., Oliullah, K., Kabir, M. M., Alom, M., & Mridha, M. F. (2023). Machine learning enabled IoT system for soil nutrients monitoring and crop recommendation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 100880. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100880>.
14. Frauendorf, J. L., & Almeida de Souza, E. (2022). The different architectures used in 1G, 2G, 3G, 4G, and 5G networks. *The architectural and technological revolution of 5G* (pp. 83–107). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10650-7_7.
15. Katekar, V., & Cheruku, J. K. (2023). The application of drone technology for sustainable agriculture in India. *Current Agriculture Research Journal*, 10(3), 352–365. <https://doi.org/10.12944/carj.10.3.19>.
16. Makam, S., Komatineni, B. K., Meena, S. S., & Meena, U. (2024). Unmanned aerial vehicles (UAVs): An adoptable technology for precise and smart farming. *Discover Internet of Things*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s43926-024-00066-5>.
17. Marcone, A., Impollonia, G., Croci, M., Blandinières, H., Pellegrini, N., & Amaducci, S. (2024). Garlic yield monitoring using vegetation indices and texture features derived from UAV multispectral imagery. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100513. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100513>.
18. Nahiyoon, S. A., Ren, Z., Wei, P., Li, X., Li, X., Xu, J., Yan, X., & Yuan, H. (2024). Recent development trends in plant protection uavs: A journey from conventional practices to cutting-edge technologies—a comprehensive review. *Drones*, 8(9), 457. <https://doi.org/10.3390/drones8090457>.
19. Pansy, D. L., & Murali, M. (2023). UAV hyperspectral remote sensor images for mango plant disease and pest identification using MD-FCM and XCS-RBFNN. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11678-9>.
20. Rivera, G., Porras, R., Florencia, R., & Sánchez-Solís, J. P. (2023). LiDAR applications in precision agriculture for cultivating crops: A review of recent advances. *Computers and Electronics in Agriculture*, 207, 107737. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107737>.
21. Sahni, R. K., Kumar, S. P., Thorat, D., Rajwade, Y., Jyoti, B., Ranjan, J., & Anand, R. (2024). Drone spraying system for efficient agrochemical application in precision agriculture. In *Applications of computer vision and drone technology in agriculture 4.0* (pp. 225–244). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8684-2_13.
22. Seong, M., Jo, O., & Shin, K. (2024). Age of information minimization in UAV-assisted data harvesting networks by multi-agent deep reinforcement curriculum learning. *Expert Systems With Applications*, 124379. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124379>.

23. Song, Y., Bi, J., & Wang, X. (2024). Design and implementation of intelligent monitoring system for agricultural environment in IoT. *Internet of Things*, 25, 101029. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101029>.
24. Surendran, U., Nagakumar, K. C. V., & Samuel, M. P. (2024). Remote sensing in precision agriculture. In *Digital agriculture* (pp. 201–223). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43548-5_7
25. Su, J., Zhu, X., Li, S., & Chen, W.-H. (2022). AI meets UAVs: A survey on AI empowered UAV perception systems for precision agriculture. *Neurocomputing*. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.11.020>.
26. Tyagi, R., & Pandey, P. C. (2024). Applications of drones in precision agriculture: Future of smart and sustainable farming. In *Remote sensing in precision agriculture* (pp. 429–453). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91068-2.00003-5>.
27. Wonde, K. M., Tsehay, A. S., & Lemma, S. E. (2022). Training at farmers training centers and its impact on crop productivity and households' income in Ethiopia: A propensity score matching (PSM) analysis. *Heliyon*, Article e09837. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09837>.
28. Zhou, J., Xu, Y., Gu, X., Chen, T., Sun, Q., Zhang, S., & Pan, Y. (2023). High-Precision mapping of soil organic matter based on UAV imagery using machine learning algorithms. *Drones*, 7(5), 290. <https://doi.org/10.3390/drones7050290>.

References

1. Burlaka, S., & Daleka, A. (2024). Tekhnolohii BPLA dlia silskoho hospodarstva [UAV technologies for agriculture]. *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu. Tekhnichni nauky – Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 339(4), 259–264. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-41>
2. Rodinkov, Ju., & Savycjkyj, A. (2024). Matematychna modelj keruvannja bezpilotnykh litaljnykh aparativ [Mathematical model of unmanned aerial vehicle control]. *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu. Tekhnichni nauky – Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 337(3(2)), 298–304. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-45>.
3. Stankevych, S. V. (November 17–18, 2022). Aghrodrony – Majbutje siljsjkogho ghospodarstva [Agro-drones are the future of agriculture]. *II Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia “Ektyv-nist ahrotekhnolohii Zhytomyrshchyny” - II All-Ukrainian Scientific and Practical Conference “Efficiency of Agricultural Technologies in Zhytomyr Region”* (p. 80–81). ZhATFK.
4. Ahmad, A., Saraswat, D., & Gamal, A. E. (2022). A survey on using deep learning techniques for plant disease diagnosis and recommendations for development of appropriate tools. *Smart Agricultural Technology*, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100083>.
5. Agrawal, J., & Arafat, M. Y. (2024). Transforming farming: A review of ai-powered UAV technologies in precision agriculture. *Drones*, 8(11), 664. <https://doi.org/10.3390/drones8110664>
6. Anushi, Jain, S., Bhujel, S., Shrivastava, U., Rishabh, Mohapatra, A., Rimpika, & Mishra, G. (2023). Advancements in Drone Technology for Fruit Crop Management: A Comprehensive Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 4367–4378. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i113617>.
7. Borikar, GP, Gharat, C, Deshmukh, SR. (2022). Application of drone systems for spraying pesticides in advanced agriculture: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1259, 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1259/1/012015>.
8. Canicatti, M., & Vallone, M. (2024). Drones in vegetable crops: A systematic literature review. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100396. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100396>.
9. Crusiol, L. G. T., Sun, L., Sun, Z., Chen, R., Wu, Y., Ma, J., & Song, C. (2022). In-Season monitoring of maize leaf water content using ground-based and uav-based hyperspectral data. *Sustainability*, 14(15), 9039. <https://doi.org/10.3390/su14159039>.
10. Dandrifosse, S., Jago, A., Huart, J. P., Michaud, V., Planchon, V., & Rosillon, D. (2024). Automatic quality control of weather data for timely decisions in agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100445>.
11. Ganesh Kumar, S. S., & Gudipalli, A. (2024). A comprehensive review on payloads of unmanned aerial vehicle. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 27(4), 637–644. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2024.08.001>.

12. Endara, F., Pérez, C., Rodriguez, J., Ortiz-Villalba, D., & Llanos, J. (2021). Analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) based on solar energy. In: *Recent advances in electrical engineering, electronics and energy: proceedings of the CIT 2020*, 288–99. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72212-8_21.
13. Islam, M. R., Oliullah, K., Kabir, M. M., Alom, M., & Mridha, M. F. (2023). Machine learning enabled IoT system for soil nutrients monitoring and crop recommendation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 100880. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100880>.
14. Frauendorf, J. L., & Almeida de Souza, E. (2022). The different architectures used in 1G, 2G, 3G, 4G, and 5G networks. *The architectural and technological revolution of 5G* (pp. 83–107). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10650-7_7.
15. Katekar, V., & Cheruku, J. K. (2023). The application of drone technology for sustainable agriculture in India. *Current Agriculture Research Journal*, 10(3), 352–365. <https://doi.org/10.12944/carj.10.3.19>.
16. Makam, S., Komatineni, B. K., Meena, S. S., & Meena, U. (2024). Unmanned aerial vehicles (UAVs): An adoptable technology for precise and smart farming. *Discover Internet of Things*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s43926-024-00066-5>.
17. Marcone, A., Impollonia, G., Croci, M., Blandinières, H., Pellegrini, N., & Amaducci, S. (2024). Garlic yield monitoring using vegetation indices and texture features derived from UAV multispectral imagery. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100513. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100513>.
18. Nahiyoon, S. A., Ren, Z., Wei, P., Li, X., Li, X., Xu, J., Yan, X., & Yuan, H. (2024). Recent development trends in plant protection uavs: A journey from conventional practices to cutting-edge technologies—a comprehensive review. *Drones*, 8(9), 457. <https://doi.org/10.3390/drones8090457>.
19. Pansy, D. L., & Murali, M. (2023). UAV hyperspectral remote sensor images for mango plant disease and pest identification using MD-FCM and XCS-RBFNN. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11678-9>.
20. Rivera, G., Porras, R., Florencia, R., & Sánchez-Solís, J. P. (2023). LiDAR applications in precision agriculture for cultivating crops: A review of recent advances. *Computers and Electronics in Agriculture*, 207, 107737. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107737>.
21. Sahni, R. K., Kumar, S. P., Thorat, D., Rajwade, Y., Jyoti, B., Ranjan, J., & Anand, R. (2024). Drone spraying system for efficient agrochemical application in precision agriculture. In *Applications of computer vision and drone technology in agriculture 4.0* (pp. 225–244). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8684-2_13.
22. Seong, M., Jo, O., & Shin, K. (2024). Age of information minimization in UAV-assisted data harvesting networks by multi-agent deep reinforcement curriculum learning. *Expert Systems With Applications*, 124379. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124379>.
23. Song, Y., Bi, J., & Wang, X. (2024). Design and implementation of intelligent monitoring system for agricultural environment in IoT. *Internet of Things*, 25, 101029. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101029>.
24. Surendran, U., Nagakumar, K. C. V., & Samuel, M. P. (2024). Remote sensing in precision agriculture. In *Digital agriculture* (pp. 201–223). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43548-5_7.
25. Su, J., Zhu, X., Li, S., & Chen, W.-H. (2022). AI meets UAVs: A survey on AI empowered UAV perception systems for precision agriculture. *Neurocomputing*. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.11.020>.
26. Tyagi, R., & Pandey, P. C. (2024). Applications of drones in precision agriculture: Future of smart and sustainable farming. In *Remote sensing in precision agriculture* (pp. 429–453). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91068-2.00003-5>.
27. Wonde, K. M., Tsehay, A. S., & Lemma, S. E. (2022). Training at farmers training centers and its impact on crop productivity and households' income in Ethiopia: A propensity score matching (PSM) analysis. *Heliyon*, Article e09837. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09837>.
28. Zhou, J., Xu, Y., Gu, X., Chen, T., Sun, Q., Zhang, S., & Pan, Y. (2023). High-Precision mapping of soil organic matter based on UAV imagery using machine learning algorithms. *Drones*, 7(5), 290. <https://doi.org/10.3390/drones7050290>.

Отримано 20.01.2025

Yurii Denisov¹, Serhii Yermolov²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: den711td@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2293-7964>.

ResearcherID: [G-1144-2016](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964). Scopus Author ID: [56338219200](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964)

²PhD Student of the Department of Electric Engineering and Information and Measuring Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: sergey.ermolow@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8786-2430>.

ResearcherID: [MBI-0037-2025](https://orcid.org/0009-0002-8786-2430)

WAYS TO INCREASE THE ACTIVITY OF MULTI-ROTOR UAVS IN AGRICULTURE

Rapid growth of mechanization of all agricultural work cannot completely reduce human participation, so agricultural automation is extremely important. In terms of automation, this study highlights crucial role of UAVs in accurate and intelligent agriculture. In the article, possibilities of using unmanned aerial vehicles (UAVs) in agriculture are considered. Advantages of using UAVs in comparison with traditional methods are described, as well as prospects for the development of this direction in the agricultural sector are highlighted. Of course, using of unmanned aerial vehicles is widespread in many countries of the world, and results of research in this direction, despite short period of implementation of this technology, are presented in numerous scientific publications. The volume of the global market for Unmanned Aircraft Systems is constantly increasing, and Ukraine, given high development of the aircraft industry, can become one of the leading manufacturers of integrated solutions and services to meet the ever-growing needs of this market. Ukraine has potential to use unmanned aerial vehicles in agriculture in terms of technical, economic and human resources.

UAVs can provide clear, high-resolution images for commercial use, including agriculture. However, at present, the area of increasing the activity of multi-rotor UAVs for agricultural needs is not sufficiently studied.

Many scientific works of domestic and foreign authors are devoted to the use of UAVs in agriculture. Nevertheless, today, the full list of works that can be performed with the help of UAVs, in particular in agriculture (agronomy), has not yet been determined.

Using unmanned aerial vehicles in agriculture is the innovation for Ukraine, since UAVs were primarily used for military needs and only after military tests began to be widely used in agriculture.

An important section of research on ways to improve the functionality of UAVs in the agricultural sector is to improve ways to control UAVs when using these advanced technologies as machine learning and the Internet of things.

The analysis of the most effective ways to increase the activity of UAVs in agriculture is carried out and it is stated that development of UAVs with new capabilities and improvement of their sensor base are the main ways of their modernization.

It is noted that addition of new sensors that provide more accurate information about the state of crops will allow farmers to monitor and care for plants as efficiently as possible.

Keywords: artificial intelligence; agricultural sector; UAV; adding sensors and sensors; crop monitoring; smart farming; Internet of things.

Fig.: 3. References: 28.

Степан Петрович Шаповал¹, Степан Йосифович Мисак²

¹доктор технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання та вентиляції
Національний університет "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: stepan.p.shapoval@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4985-0930>

²кандидат технічних наук, старший викладач кафедри теплоенергетики, теплових та атомних електричних станцій
Національний університет "Львівська політехніка" (Львів, Україна)

E-mail: stepan.y.mysak@lpnu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2064-7015>

ТЕПЛОВА ЕФЕКТИВНІСТЬ ГІБРИДНОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕЛІОКОЛЕКТОРА ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

У статті досліджено ефективність гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК). Встановлено, що його теплова ефективність збільшується на 41 % зі зменшенням інтенсивності сонячного випромінювання до 300 Вт/м², а електрична ефективність зменшується лише на 2,4 %. Доведено мінімальний вплив кута нахилу ГТФГК до горизонту та питомої масової витрати теплоносія в його контурі на ефективність геліосистеми. Застосування конструкції з концентраторами випромінювання забезпечує стабільну та продуктивну роботу ГТФГК в умовах недостатнього освітлення.

Ключові слова: сонячне випромінювання; гібридний геліоколектор; сонячна гібридна система; теплова ефективність; електрична ефективність; фотоелемент; сонячний концентратор.

Рис.: 13. Бібл.: 22.

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток відновлюваної енергетики сприяє активному впровадженню гібридних сонячних систем, зокрема геліоколекторів, що поєднують у собі функції фотоелектричних та теплових установок. Такі системи дозволяють ефективно використовувати сонячне випромінювання, одночасно генеруючи електроенергію та теплову енергію. Це особливо актуально для територій із обмеженим простором для встановлення традиційних енергетичних систем. Завдяки можливості працювати навіть за умов недостатнього освітлення, таких як похмурі дні або ранкове та вечірнє розсіяне світло, гібридні геліоколектори забезпечують стабільне енергопостачання.

Інтеграція таких технологій у сучасну енергосистему сприяє підвищенню енергетичної незалежності та зменшенню залежності від викопних палив. Це особливо важливо в контексті змін клімату, нестабільності традиційного енергетичного сектору та необхідності скорочення шкідливих викидів. Оскільки гібридні геліоколектори працюють виключно на основі сонячного випромінювання, вони не завдають шкоди довкіллю, сприяючи зменшенню рівня забруднення атмосфери та скороченню викидів CO₂.

Крім екологічних переваг, використання таких систем дозволяє значно знизити витрати на теплопостачання житлових і комерційних об'єктів, що робить їх економічно вигідним рішенням. Завдяки цьому гібридні геліоколектори набувають дедалі більшої популярності серед підприємств, державних установ і приватних споживачів, сприяючи переходу до сталої та екологічно безпечної енергетики.

Постановка проблеми. Зміни клімату, спричинені глобальним потеплінням, вимагають від людства негайних дій для зменшення шкідливих викидів та скорочення використання викопного палива. У зв'язку з цим на міжнародному рівні розроблено численні стратегії сталого розвитку [1], спрямовані на збереження довкілля та забезпечення екологічно безпечного майбутнього.

Одним із ключових документів, що регламентують зниження викидів CO₂, є Паризька угода [2], яка замінила Кіотський протокол. Відповідно до її положень, кожна країна встановлює національні цілі щодо скорочення викидів парникових газів і звітує про досягнення кожні п'ять років.

Згідно з даними звіту Special Report on Global Warming of 1.5 °C [3], прогнозується підвищення середньої температури нашої планети на 1,5 °C у період між 2030 і 2052 роками. Для протидії кліматичним змінам необхідно зменшити рівень енергоспоживання, підвищити енергоефективність у всіх секторах економіки, скоротити використання традиційних джерел енергії та активніше розвивати відновлювані та альтернативні енергетичні технології.

У цьому контексті Європейський Союз запровадив програму European Green Deal [4]. Вона спрямована на створення економіки замкнутого циклу, мінімізацію викидів шкідливих речовин, які забруднюють довкілля, а також на раціональне та енергоефективне використання природних ресурсів. Впровадження цієї програми є важливим кроком на шляху до сталого майбутнього та збереження планети для наступних поколінь. Європейська спільнота ставить за мету суттєве скорочення викидів парникових газів, прагнучи знизити їх обсяг на 95 % до 2050 року в межах ініціативи The 2030 Climate and Energy Framework [5]. Кожна країна ЄС формує власні національні кліматичні плани до 2030 року, які охоплюють питання енергетичної безпеки, диверсифікації енергоресурсів, підвищення енергоефективності та реалізації Паризької угоди.

Пріоритетним напрямком є розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Раніше, згідно з програмою Fit for 55 [6], планувалося підвищити їх частку до 40 % у загальному кінцевому споживанні енергії. Однак після військового вторгнення в Україну 2014 року ЄС прийняв нову ініціативу REPowerEU [7], згідно з якою ця частка має зрости до 45 %. Такий підхід спрямований на посилення енергетичної незалежності та перехід до стійких, екологічно чистих, відновлювальних джерел енергії.

На сьогодні активно розвиваються технології використання відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної енергетики [8,9], а також створюються новітні високоенергоефективні матеріали, що покращують ефективність і довговічність сонячних колекторів [10]. Одним із перспективних напрямів є гібридні сонячні колектори, які поєднують виробництво теплової та електричної енергії. Вони сприяють збільшенню загальної ефективності енергетичних систем і скороченню втрат енергії. Проте ключові технічні виклики включають покращення коефіцієнта корисної дії, мінімізацію теплових втрат, забезпечення стабільності роботи впродовж тривалого часу та розробку інноваційних матеріалів із високою поглинальною здатністю.

Враховуючи ці аспекти, створення вдосконалених гібридних геліоколекторів є важливим кроком у розвитку сонячної енергетики. Інтеграція передових технологій у такі системи дозволяє підвищити продуктивність, забезпечити надійність і зробити відновлювану енергію більш доступною та ефективною для широкого застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження у сфері сонячної енергетики підтверджують, що гібридні сонячні колектори мають значний потенціал завдяки їхній здатності одночасно генерувати електричну та теплову енергію. Аналіз літературних джерел показує, що такі системи демонструють вищу ефективність у порівнянні з окремими фотоелектричними або тепловими колекторами [11; 12]. Новітні дослідження спрямовані на вдосконалення конструкцій, підвищення продуктивності та інтеграцію нових матеріалів для покращення показників роботи [13; 14].

У сучасних наукових публікаціях наголошується на важливості комбінування різних типів колекторів для максимального використання сонячної енергії. Встановлено, що гібридні системи можуть бути ефективно адаптовані під різні кліматичні умови та технологічні потреби, поєднуючи характеристики плоских і фотоелектричних колекторів [15; 16]. Водночас дослідники відзначають необхідність оптимізації теплових та

електричних характеристик таких пристроїв для підвищення їхньої довговічності та ефективності використання ресурсів [17].

Застосування гібридних колекторів у системах енергозабезпечення є перспективним напрямом розвитку зеленої енергетики. Дослідження свідчать, що близько 90 % сонячної енергії поглинається поверхнею фотоелектричних панелей, проте лише 15 % з неї перетворюється на електричну енергію, а ще 10 % використовується у вигляді теплової енергії [18–20]. У зв'язку з цим дослідники запропонували розділити гібридний сонячний колектор на функціональні сегменти для підвищення ефективності обох видів енергії. Крім цього, використання концентраторів дозволяє збільшити тепловий коефіцієнт корисної дії системи, що підтверджується теоретичними та експериментальними дослідженнями [21; 22].

Отже, гібридні сонячні колектори є перспективною технологією, яка має потенціал для широкого впровадження у сфері відновлюваної енергетики, сприяючи підвищенню енергоефективності та зменшенню залежності від традиційних джерел енергії.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Огляд сучасних наукових досліджень свідчить про недостатню вивченість гібридних геліоколекторів, особливо в аспекті їхньої ефективності та теплотехнічних характеристик. Попри зростаючий інтерес до відновлюваних джерел енергії, відсутність комплексних методик розрахунку та стандартизованих підходів до проектування подібних систем ускладнює їх широкомасштабне впровадження. Подальші дослідження мають бути спрямовані на аналіз термодинамічних процесів у таких установках, оптимізацію їх конструктивних параметрів та розробку універсальних алгоритмів для моделювання їх роботи у різних кліматичних умовах.

Метою статті є дослідження спрямоване на оцінку ефективності гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора для максимального використання сонячної енергії. Основна увага приділяється підвищенню теплової продуктивності та електричної генерації, що сприятиме сталому розвитку та зниженню викидів вуглецю. Особливо важливим є оптимізація конструкції, розміщення колектора для покращення його ефективності, зменшення теплових втрат та забезпечення довготривалої стабільної роботи в різних кліматичних умовах. Використання таких технологій відкриває нові можливості для інтеграції відновлюваних джерел енергії в загальну енергетичну систему, сприяючи незалежності від викопного палива та розширенню екологічно чистих рішень.

Виклад основного матеріалу. У статті проаналізовано роботу гібридної системи енергопостачання (ГСЕ), що використовує гібридний тепловий фотоелектричний геліоколектор (ГТФГК). Принципова схема цієї системи представлена на рис. 1.

Запропонована ГСЕ, що поєднує ГТФГК та тепловий акумулятор (ТА). ГТФГК складається з двох частин: теплофотоелектричної 2 та теплової 6, а ТА 12 слугує для накопичення отриманого тепла. Передача теплової енергії між цими компонентами здійснюється за допомогою трубопроводів для нагрітого 10 і охолодженого теплоносія 11.

Циркуляцію теплоносія, яким є вода, забезпечує pompa 13, який перекачує нагріту воду від ГТФГК до ТА, звідки тепло постачається до споживачів. Управління циркуляційною помпою здійснюється автоматично блоком керування 14 на основі показників термодатчиків 9, розміщених на виходах ГТФГК та ТА. Для підвищення ефективності системи та зменшення тепловтрат конструкція ГТФГК включає теплоізоляційний шар 3 та концентратори сонячного випромінювання 7, які фокусують сонячну енергію на теплопоглинальні трубки 8. Генерація електроенергії відбувається завдяки фотоелементам 4, на які потрапляє сонячне світло через прозоре захисне покриття 5.

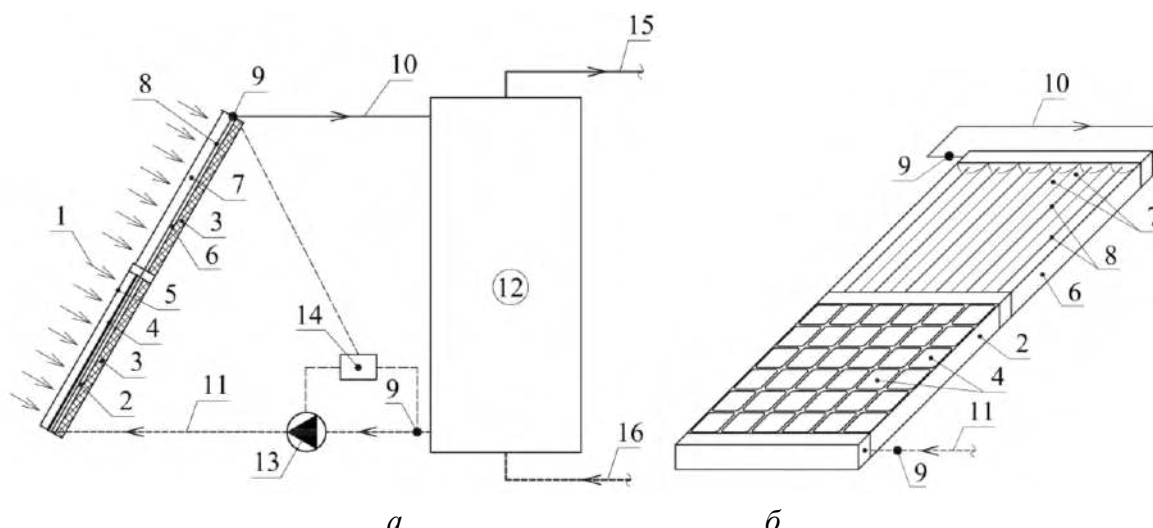


Рис. 1. Принципова схема ГСЕ з ГТФГК:

а – вигляд збоку і б – вигляд зверху:

- 1 – джерело сонячного випромінювання; 2 – теплофотоелектрична частина гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК); 3 – теплоізолятор; 4 – фотоелементи; 5 – світлопрозоре покриття; 6 – теплова частина ГТФГК; 7 – концентратори сонячного випромінювання; 8 – теплопоглинальні трубки; 9 – термодатчики; 10, 11 – трубопроводи нагрітого та охолодженого теплоносія; 12 – тепловий акумулятор (ТА); 13 – циркуляційна помпа; 14 – блок управління; 15, 16 – трубопроводи нагрітого та охолодженого теплоносія в контурі споживача
Джерело: розроблено авторами.

Експериментальні випробування системи проводилися за температури навколишнього середовища 15°C . ГТФГК був орієнтований строго перпендикулярно до напрямку сонячних променів. Параметри роботи системи фіксувалися кожні 5 хвилин, при цьому масова витрата теплоносія залишалася постійною.

Перші шість експериментів, залежності вихідних параметрів яких представлені на рис. 2–7, здійснювалися за фіксованих азимутального кута нахилу ГТФГК до місцевого меридіана α та його нахилу до горизонту β рівних 30° . А другі шість експериментів, зміни вихідних параметрів яких зображені на рис. 8–13, – за фіксованих $\alpha = 30^{\circ}$ та та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК $I_T = 300 \text{ Вт/м}^2$.

На рис. 2, на основі експериментальних досліджень, зображена зміна теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$, яка залежить від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , Вт/м^2 , за питомої масової витрати теплоносія $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$.

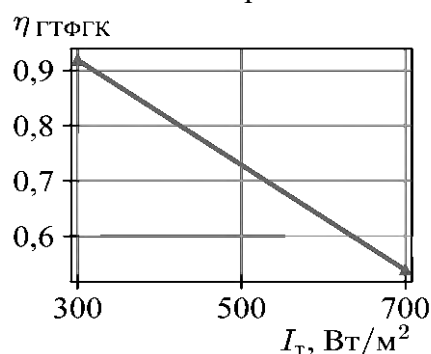


Рис. 2. Залежність теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_m при $\alpha = 30^{\circ}$, $\beta = 30^{\circ}$, $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$
Джерело: розроблено авторами.

Як помітно на рис. 2, теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ зменшується на 41 % з 0,92 до 0,54 зі зростанням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T з 300 Вт/м² до 700 Вт/м².

Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ в залежності від масової витрати G , кг/с, та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , Вт/м², зображена на рис. 3.

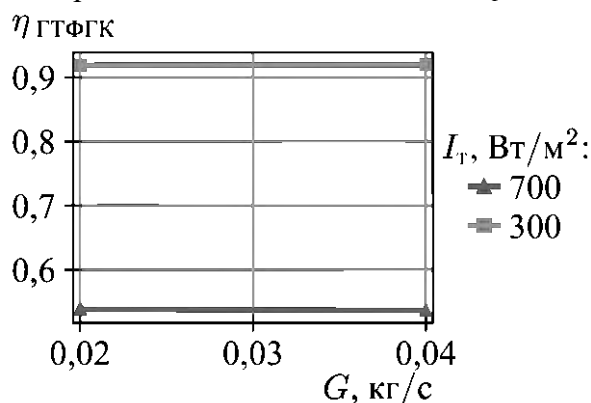


Рис. 3. Залежність теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ від масової витрати G та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_m при $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 30^\circ$
Джерело: розроблено авторами.

Згідно з рис. 3, теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ не залежить від масової витрати теплоносія в ньому G , та зменшується на 41 % з 0,92 до 0,54 зі зростанням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T з 300 Вт/м² до 700 Вт/м².

На рис. 4 зображено залежність зміни теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T , Вт/м², та масової витрати теплоносія в ньому G , кг/с.

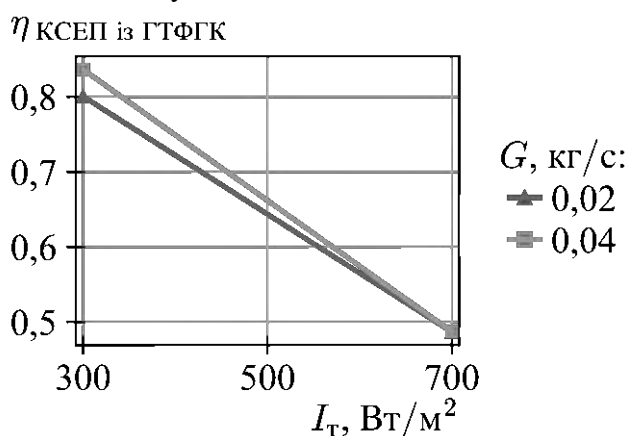


Рис. 4. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_m та масової витрати теплоносія в ньому G при $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 30^\circ$
Джерело: розроблено авторами.

Згідно з рис. 4, теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ майже не залежить від питомої масової витрати теплоносія G та зменшується зі зростанням інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T : для 0,01 кг/(м²·с) – з 0,8 до 0,49, тобто на 39 %, а для 0,02 кг/(м²·с) – з 0,84 до 0,49, або на 42 %.

На основі експериментальних даних побудована графічна залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від масової витрати теплоносія G , кг/с, та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T , Вт/м², та зображена на рис. 5.

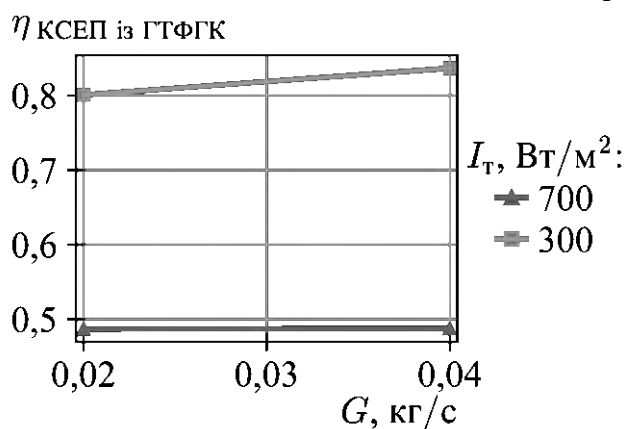


Рис. 5. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від масової витрати теплоносія G та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_m при $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 30^\circ$

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 5 видно, що для інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T рівній 700 Вт/м² тепла ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ не залежить від питомої витрати теплоносія G в системі та становить 0,49, а для I_T рівній 300 Вт/м² – більша в 1,63 раза, на 5 % зростаючи при збільшенні G з 0,01 кг/(м²·с) до 0,02 кг/(м²·с).

Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$, що залежить від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_T , Вт/м², за питомої масової витрати теплоносія $G = 0,01$ кг/(м²·с), подана на рис. 6.

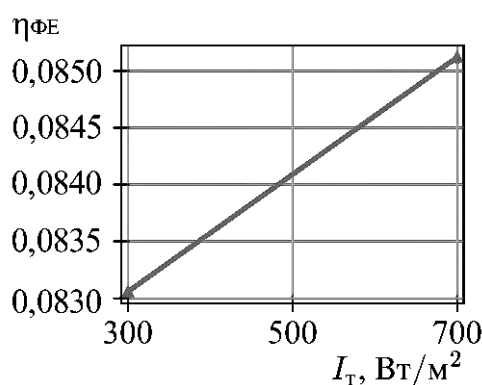


Рис. 6. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_m при $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 30^\circ$, $G = 0,01$ кг/(м²·с)

Джерело: розроблено авторами.

Електрична ефективність фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$ на рис. 6 при зростанні інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T з 300 Вт/м² до 700 Вт/м² на 2,4 % збільшується з 0,083 до 0,085.

Зміна ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від масової витрати теплоносія в ньому G , кг/с, та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_T , Вт/м², побудована на рис. 7.

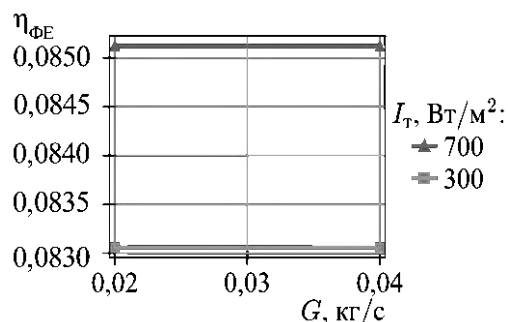


Рис. 7. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від масової витрати теплоносія G та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_m при $\alpha = 30^\circ$ та $\beta = 30^\circ$

Джерело: розроблено авторами.

З рис. 7 випливає, що електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ не залежить від масової витрати теплоносія в ньому G та є лише на 2,4 % більшою – з 0,083 до 0,085 – при збільшенні I_m з 300 Вт/м² до 700 Вт/м².

Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$ залежно від масової витрати теплоносія G , кг/с, та кута нахилу його до горизонту β , град, представлена на рис. 8.

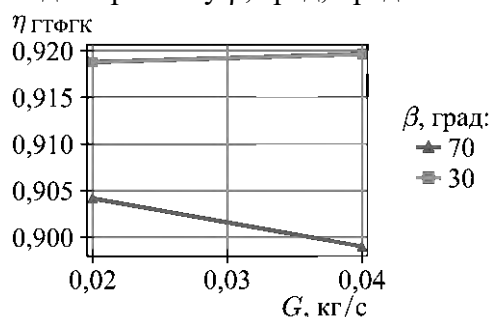


Рис. 8. Залежність теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$ від масової витрати теплоносія G та кута нахилу його до горизонту β при $\alpha = 30^\circ$, $I_m = 300$ Вт/м²

Джерело: розроблено авторами.

На основі аналізу експериментальних даних, зображених на рис. 8, виявлено дуже малий (менше за 1 %), але різнонаправлений характер зміни теплової ефективності ГТФГК від збільшення масової витрати теплоносія G , водночас вона на 2 % зменшується при збільшенні кута нахилу ГТФГК до горизонту β з 30° до 70° .

На рис. 9 знаходяться графіки зміни теплової ефективності ГТФГК $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$ залежно від кута нахилу його до горизонту β , град, та масової витрати теплоносія G , кг/с.

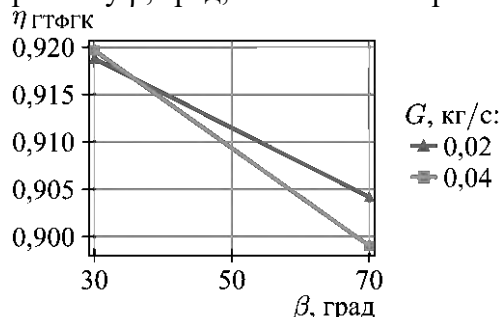


Рис. 9. Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$ залежно від кута нахилу його до горизонту β та масової витрати теплоносія G при $\alpha = 30^\circ$, $I_m = 300$ Вт/м²

Джерело: розроблено авторами.

Як помітно на рис. 9, теплова ефективність ГТФГК $\eta_{\text{ГТФГК}}$ зменшується приблизно на 2 % при збільшенні кута нахилу його до горизонту β з 30° до 70° , водночас незначно (менше 1 %) вона залежить від зміни питомої масової витрати теплоносія в ГТФГК з $0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ до $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

На основі експериментальних даних побудована графічна залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від масової витрати теплоносія G , $\text{кг}/\text{с}$, та кута нахилу ГТФГК до горизонту β , град, та зображена на рис. 10.

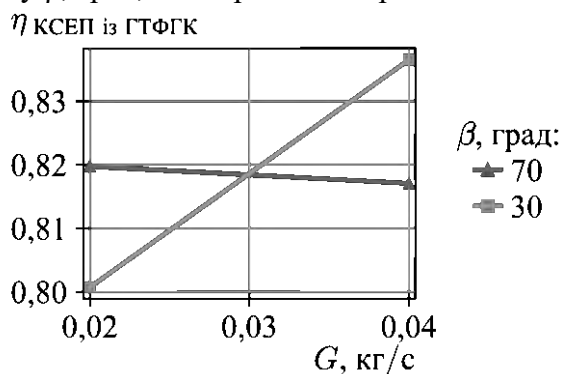


Рис. 10. Теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ залежно від масової витрати теплоносія G та кута нахилу ГТФГК до горизонту β при $\alpha = 30^\circ$, $I_m = 300 \text{ Вт}/\text{м}^2$
Джерело: розроблено авторами.

На рис. 10 помітний різнонаправлений характер зміни теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$. Для $\beta = 30^\circ$ при збільшенні питомої витрати теплоносія G вона на 5 % збільшується, тоді як для $\beta = 70^\circ$ навпаки трохи зменшується, також $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ для G рівній $0,015 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ при різних β однакові, а для $0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ та $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ на 2,0–2,5 % відрізняються.

Зміна теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від кута нахилу ГТФГК до горизонту β , град, та масової витрати теплоносія в ньому G , $\text{кг}/\text{с}$, представлена на рис. 11.

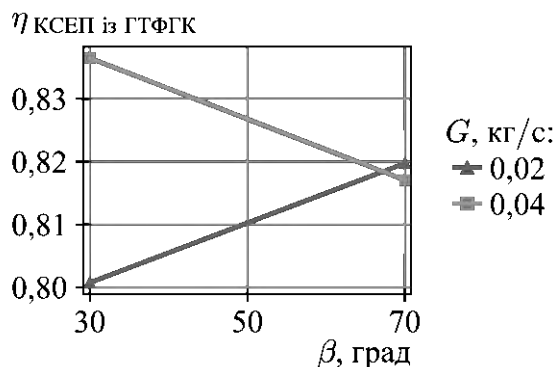


Рис. 11. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від кута нахилу ГТФГК до горизонту β та масової витрати теплоносія в ньому G при $\alpha = 30^\circ$, $I_m = 300 \text{ Вт}/\text{м}^2$
Джерело: розроблено авторами.

Згідно рис. 11, теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ для різних питомих масових витрат теплоносія G та кутів нахилу ГТФГК до горизонту β має різнонаправлений характер зміни. Для G рівній $0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ зі збільшенням β з 30° до 70° вона зростає на 2,5 % з 0,8 до 0,82, а для G рівній $0,02 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ – настільки процентів спадає з 0,84

до 0,82. Для кута нахилу ГТФГК до горизонту рівному 30° значення теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК на 5 % відрізняються для різних питомих витрат, а для приблизно 65° – від них не залежать, дорівнюючи 0,82.

Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від масової витрати теплоносія в ньому G , кг/с, та кута нахилу ГТФГК до горизонту β , град, побудована на рис. 12.

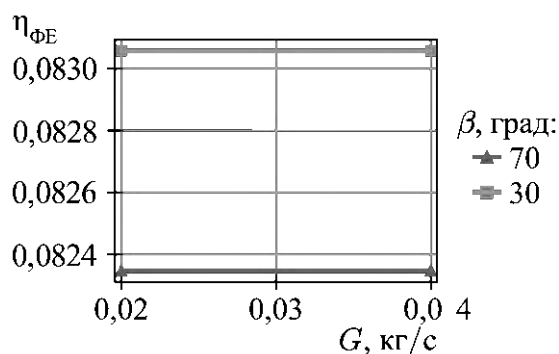


Рис. 12. Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ залежно від масової витрати теплоносія G та кута його нахилу до горизонту β при $\alpha = 30^\circ$ та $I_m = 300 \text{ Вт/м}^2$

Джерело: розроблено авторами.

З рис. 12 випливає, що електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ не залежить від масової витрати теплоносія в ньому G та майже не залежить від кута нахилу ГТФГК до горизонту β , приблизно знаходячись від 0,082 до 0,083.

Електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$, що залежить від кута нахилу його до горизонту β , град, за питомої масової витрати теплоносія $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, подана на рис. 13.

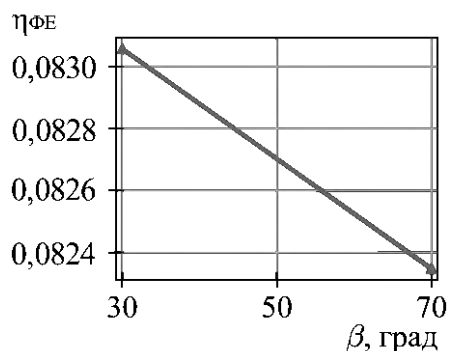


Рис. 13. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ від кута нахилу його до горизонту β при $\alpha = 30^\circ$, $I_m = 300 \text{ Вт/м}^2$ та $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$

Джерело: розроблено авторами.

Як видно на рис. 13, електрична ефективність фотоелементів ГТФГК $\eta_{\text{ФЕ}}$ майже не залежить від кута нахилу ГТФГК до горизонту β , при зміні якого від 30° до 70° тільки на 1 % спадає.

Висновки. Для азимутального кута відхилення по нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α та кута нахилу ГТФГК до горизонту β рівних 30° , для розглянутих інтенсивностей сонячного випромінювання в його площині I_t зміна масової витрати теплоносія в геліосистемі G з $0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ до $0,02 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ не впливає на зміну теплової ефективності

ГТФГК $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$, електричної ефективності його фотоелементів $\eta_{\text{ФЕ}}$ та теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ при $I_{\text{т}} = 700 \text{ Вт/м}^2$ (при $I_{\text{т}} = 300 \text{ Вт/м}^2$ ця ефективність $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зростає на 5 %). При збільшенні $I_{\text{т}}$ з 300 Вт/м^2 до 700 Вт/м^2 $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$ зменшується на 41 %, з 0,92 до 0,54, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ зменшується на 39 %, з 0,8 до 0,49, для G з $0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ та на 42 %, з 0,84 до 0,49, для G з $0,02 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$. А ефективність $\eta_{\text{ФЕ}}$ при цьому збільшується на 2,4 %, з 0,083 до 0,085. Отже, інтенсивність сонячного випромінювання в площині ГТФГК $I_{\text{т}}$ є домінуючим фактором впливу на $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ФЕ}}$.

Для $\alpha = 30^\circ$ та $I_{\text{т}} = 300 \text{ Вт/м}^2$, при кутах нахилу ГТФГК до горизонту β рівних 30° та 70° збільшення G з $0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ до $0,02 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ майже не впливає (в межах 1 %) на зміну $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ФЕ}}$. А $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ для $\beta = 30^\circ$ збільшується на 5 %, тоді як для $\beta = 70^\circ$ вона майже однакова. При збільшенні β з 30° до 70° для розглянутих G ефективності $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ФЕ}}$ зменшуються на 2 % та 1 % відповідно, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ для $G = 0,01 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ зростає на 2,5 %, з 0,8 до 0,82, а для $G = 0,02 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ на 2,5 % спадає, з 0,84 до 0,82. Отже, кут нахилу ГТФГК до горизонту β та питома масова витрата теплоносія в його контурі G незначно впливають на зміну $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ та $\eta_{\text{ФЕ}}$.

Розроблена конструкція ГТФГК з концентраторами сонячного випромінювання незалежно від питомої маси теплоносія в контурі геліосистеми G демонструє пристойну електричну ефективність $\eta_{\text{ФЕ}}$ рівну $0,08 \div 0,09$, не сильно залежну від розглянутих в цій статті факторів, та високу теплову ефективність $\eta_{\text{т, ГТФГК}} = 0,8 \div 0,9$ при зменшенні інтенсивності сонячного випромінювання в його площині $I_{\text{т}}$ до 300 Вт/м^2 або кута нахилу ГТФГК до горизонту β до 30° , що характеризує його ефективну роботу в умовах недостатньої освітленості, включаючи регіони з високими широтами. Для збільшення $\eta_{\text{ФЕ}}$ з метою відведення тепла від фотоелементів необхідно надалі удосконалювати теплофотоелектричну частину ГТФГК та дослідити залежність $\eta_{\text{т, ГТФГК}}$, $\eta_{\text{ГСЕ з ГТФГК}}$ від інших значень (рівнів) факторів впливу на геліосистему в реальних умовах її експлуатації.

Список використаних джерел

1. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. Retrieved from <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.
2. United Nations (2015). Paris Agreement. https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf.
3. IPCC (2018). Global Warming of 1.5°C. Summary for Policymakers. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf.
4. *The European Green Deal*. European Commission. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.
5. The 2030 climate and energy framework. European Council Council of the European Union <https://www.consilium.europa.eu/en>.
6. Fit for 55. Retrieved from <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition>.
7. *REPowerEU*. (n.d.). European Commission. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en.
8. Venhryn, I., Shapoval, S., Voznyak, O., Datsko, O., & Gulai, B. (2021). Modelling of optical characteristics of the thermal photovoltaic hybrid solar collector. In *2021 IEEE 16th international conference on computer sciences and information technologies (CSIT)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/csit52700.2021.9648738>.

9. Mysak, Y., Pona, O., Shapoval, S., Kuznetsova, M., & Kovalenko, T. (2017). Evaluation of energy efficiency of solar roofing using mathematical and experimental research. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8 (87)), 26–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103853>.
10. Guminilovych, R., Shapoval, P., Yatchyshyn, I., & Shapoval, S. (2015). Modeling of chemical surface deposition (CSD) of cds and cdse semiconductor thin films. *Chemistry & Chemical Technology*, 9(3), 287–292. <https://doi.org/10.23939/chcht09.03.287>.
11. Amira Lateef Abdullah, Suhaimi Misha, Noreffendy Tamaldin, Mohd Afzanizam Mohd Rosli, & Fadhil Abdulameer Sachit. (2024). Technology Progress on Photovoltaic Thermal (PVT) Systems with Flat-Plate Water Collector Designs: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 59(1), 107–141. https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/article/view/3217.
12. Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, K., & Shapoval, S. (2020). Solar collectors integrated into transparent facades. *Production Engineering Archives*, 26(3), 84–87. <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.17>.
13. Said, Z., Alshehhi, A. A., & Mehmood, A. (2018). Predictions of UAE's renewable energy mix in 2030. *Renewable Energy*, 118, 779–789. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.075>.
14. Diwania, S., Agrawal, S., Siddiqui, A. S., & Singh, S. (2019). Photovoltaic–thermal (PV/T) technology: A comprehensive review on applications and its advancement. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(1), 33–54. <https://doi.org/10.1007/s40095-019-00327-y>.
15. Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy*, 81(9), 1117–1131. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.002>.
16. Суржик, О. М. (2016). *Теплофізичні характеристики геліоенергетичних модулів з композиційними тепловідводами* [Неопубл. дис. ... канд. техн. наук]. Інститут Відновлюваної Енергетики.
17. Morteza pour, H., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, & M. H., Minaei S. (2012). Performance analysis of a two-way hybrid photovoltaic/thermal solar collector. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14, 767–780.
18. Ramos, A., Guarracino, I., Mellor, A., Alonso-Elvarez, D., Childs, P., Ekins-Daukes, N. J., & Markides, C. N. (2017). Solar-thermal and hybrid photovoltaic-thermal systems for renewable heating. *Briefing paper*, 22. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10473.29280>.
19. Ramos, F., Cardoso, A., & Alcaso, A. (2010). Hybrid Photovoltaic-Thermal Collectors. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 314, 477–484. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11628-5_53.
20. Склянюк, А., & Кучер, А. (2011). Дослідження роботи геліоустановки для спільної генерації електричної та теплової енергії. У *Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання* (с. 275). ТНТУ.
21. Mysak, S., Shapoval, S., & Matiko, H. (2023). Simulation of hybrid solar collector operation in heat supply system. *Energy Engineering and Control Systems*, 9(2), 61–68. <https://doi.org/10.23939/jeecs2023.02.061>.
22. Hamdan, M. A., Abdelhafez, E., Ahmad, R., & Aboushi, A. R. (2014) Solar Thermal Hybrid Heating System. Conference: *Energy Sustainability and Water Resource Management for Food Security in the Arab Middle East*, Beirut, Lebanon, 1–11.

References

1. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. *A/RES/70/1*. Retrieved from <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>.
2. United Nations (2015). Paris Agreement. Retrieved from https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215%2006-03%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf.
3. IPCC (2018). Global Warming of 1.5°C. Summary for Policymakers. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf.
4. European Commission. (2019). The European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.

5. The 2030 climate and energy framework. Retrieved from <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework>.
6. Fit for 55. Retrieved from <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition>.
7. REPowerEU. (n.d.). *European Commission*. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en.
8. Venhryn, I., Shapoval, S., Voznyak, O., Datsko, O., Gulai, B. (2021). Modelling of optical characteristics of the Thermal Photovoltaic Hybrid Solar Collector. *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, 2021, 255–258. <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648738>
9. Mysak, Y., Pona, O., Shapoval, S., Kuznetsova, M., Kovalenko, T. (2017) Evaluation of energy efficiency of solar roofing using mathematical and experimental research. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8-87), 26–32. doi: 10.15587/1729-4061.2017.103853.
10. Guminilovych, R., Shapoval, P., Yatchyshyn, I., Shapoval, S. (2015). Modeling of chemical surface deposition (CSD) of CdS and CdSe semiconductor thin films. *Chemistry and Chemical Technology*, 9(3), 287–292.
11. Abdullah, A. L., Misha, S., Tamaldin, N., Rosli, M. A. M., Sachit, F. I. A. (2019). Technology Progress on Photovoltaic Thermal (PVT) Systems with Flat-Plate Water Collector Designs: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 59(1), 107–141.
12. Zhelykh, V., Venhryn, I., Kozak, K., Shapoval, S. (2020). Solar collectors integrated into transparent facades. *Production Engineering Archives*, 26(3), 84–87. <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.17>. ISSN: 2353-5156.
13. Said, Z., Alshehhi, A. A., Mehmood, A. (2018). Predictions of UAE's renewable energy mix in 2030. *Renewable Energy*, 118, 779–789. doi: 10.1016/j.renene.2017.11.075
14. Diwania, S., Agrawal, S., Siddiqui, A. S., Singh, S. (2020). Photovoltaic–thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11, 33–54.
15. Tripanagnostopoulos, Y. (2007). Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems. *Solar Energy*, 81(9), 1117–1131. doi: 10.1016/j.solener.2007.04.002
16. Surzhyk, O. M. (2016). Teplofizychni kharakterystyky helioenergetychnykh moduliv z kompozytsiinymy teplovidvodamy [Heat physical characteristics of a solar power module with composite heat sink]. *Instytut Vidnovliuvanoi Enerhetyky Institute of Renewable Energy*, Kyiv
17. Morteza pour, H., Ghobadian, B., Khoshtaghaza, M. H., Minaei S. (2012). Performance analysis of a two-way hybrid photovoltaic/thermal solar collector. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14, 767–780.
18. Ramos, A., Guarracino, I., Mellor, A., Alonso-Elvarez, D., Childs, P., Ekins-Daukes, N. J., Markides, C. N. (2017). Solar-thermal and hybrid photovoltaic-thermal systems for renewable heating. *Briefing paper*, 22. doi: 10.13140/RG.2.2.10473.29280
19. Ramos, F., Cardoso, A., Alcaso, A. (2010). Hybrid Photovoltaic-Thermal Collectors. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 314, 477–484. doi: 10.1007/978-3-642-11628-5_53.
20. Sklianko A., Kucher A. (2011) Doslidzhennia roboty helioustanovky dlia spilnoi heneratsii elektrichnoi ta teplovoi enerhii [Research on the operation of a solar installation for the combined generation of electricity and heat energy]. *U Pryrodnychi ta humanitarni nauky. Aktualni pytannia TNTU In Environmental and Humanitarian Sciences – Urgent issues* (p. 275). Ternopil Technical National University.
21. Mysak, S., Shapoval, S., Matiko, H. (2023). Simulation of Hybrid Solar Collector Operation in Heat Supply System. *ENERGY ENGINEERING AND CONTROL SYSTEMS*, 9(2), 61–62.
22. Hamdan, M. A., Abdelhafez, E., Ahmad, R., Aboushi, A. R. (2014) Solar Thermal Hybrid Heating System, Conference: *Energy Sustainability and Water Resource Management for Food Security in the Arab Middle East*, Beirut, Lebanon, 1–11.

Отримано 20.03.2025

Stepan Shapoval¹, Stepan Mysak²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: stepan.p.shapoval@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4985-0930>.

²PhD in Technical Sciences, Professor of the Department of Heating and Thermal Power
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: stepan.y.mysak@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2064-7015>.

THERMAL EFFICIENCY OF A HYBRID PHOTOVOLTAIC SOLAR COLLECTOR FOR ENERGY-EFFICIENT POWER SUPPLY SYSTEMS

In the article, topical issue of increasing efficiency of solar energy production thanks to the proposed design of the hybrid thermal photovoltaic solar collector (HTPSC) and converting it into electrical and thermal energy are considered.

It is shown that the proposed design provides stable and efficient energy supply even in low light conditions. Integration of this system into the energy system increases energy independence, reduces heating costs and reduces CO₂ emissions. Indeed, today it is important to fulfill international commitments to combat climate change on our planet. In accordance with provisions of the Paris Agreement, each country sets national goals to reduce greenhouse gas emissions that increase the environment temperature. This can be achieved by using energy from renewable energy sources instead of fossil fuels and increasing energy efficiency. In addition, according to the UN Sustainable Development Goals, renewable energy should be efficient, cheap and accessible to everyone.

That is why creation of improved hybrid solar collectors is an important step in the solar energy development. Integration of advanced technologies into these systems allows increasing productivity, reducing operating costs, ensuring reliability and making renewable energy more accessible and efficient for widespread use. The aim of the paper is to study and assess effectiveness of the proposed design of the HTPSC for maximum use of solar radiation. The main focus is on increasing thermal efficiency due to the use of solar concentrators and improving electrical efficiency due to intensified heat removal from photovoltaic cells. The compact and inexpensive design of the HTPSC using inexpensive materials and high thermal efficiency allows to successfully solve existing climate problems.

Operation of the hybrid-power-supply-system using a hybrid thermal photovoltaic solar collector is analyzed by simulating the thermal state of the HTPSC under influence of constant solar radiation to establish a quasi-stationary thermal regime of the system.

It was revealed that the developed design of the HTPSC with solar radiation concentrators, regardless of the specific mass of the coolant in the solar system circuit, demonstrates decent electrical efficiency equal to $0.08 \div 0.09$, not strongly dependent on factors considered in this article, and high thermal efficiency of $0.8 \div 0.9$ with decrease in the intensity of solar radiation in its plane to 300 W/m^2 or the angle of inclination of the HTPSC to the horizon β to 30 degrees, characterizing its effective operation in conditions of insufficient illumination, including regions with high latitudes.

Keywords: solar radiation; PV/T collector; solar hybrid system; thermal efficiency; electrical efficiency; photocell; solar concentrator.

Fig.: 13. References: 22.

**Василь Федорович Шинкаренко¹, Анна Анатоліївна Шиманська²,
Вікторія Володимирівна Котлярова³**

¹доктор технічних наук, професор, професор кафедри електромеханіки
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: svf1102@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5054-823X>

ResearcherID: [AAK-3777-2020](https://orcid.org/0000-0002-5054-823X). **SCOPUS Author ID:** 7005550726

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електромеханіки
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: shym.anna@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-2481-0908>

ResearcherID: [ABB-9534-2020](https://orcid.org/0000-0003-2481-0908). **SCOPUS Author ID:** 57202580817

³старший викладач кафедри електромеханіки
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: sharik_2004@ukr.net. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-4182-4175>

ResearcherID: [AAK-3782-2020](https://orcid.org/0000-0002-4182-4175). **SCOPUS Author ID:** 57202578038

ПРИНЦИП ІНВЕРСІЇ В СТРУКТУРНІЙ ОРГАНІЗАЦІЇ І ЕВОЛЮЦІЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Проаналізовано фундаментальність принципу інверсії, який є предметом міждисциплінарних досліджень. Акцентовується увага на необхідність системного аналізу видів і прояву інверсії в структурній організації і функціонуванні електромеханічних об'єктів. За результатами аналізу генетичних програм структуроутворення і постановки еволюційних експериментів визначено структуру основних видів інверсії і запропоновано їх класифікацію. Вперше аналізується генетична природа й особливості прояву топологічної інверсії хромосомного рівня. Показано, що область існування довільних видів інверсії визначається їхніми макrogenетичними програмами. Аналізується генетична природа інваріантних інформаційних зв'язків хромосомної, електромагнітної, просторової, динамічної інверсій та їх комбінаторних варіантів, з періодичною структурою генетичної класифікації (породжувальної системи) первинних джерел електромагнітного поля. На конкретних прикладах показано, що кожен вид інверсії визначає принципи структуроутворення і структурну еволюцію відповідних функціональних класів електромеханічних об'єктів. Аналізується структурний потенціал інверсних видів-близнюків, який розглядається як потенційне джерело структуроутворення і технічних інновацій. Розглянуто умови порушення інверсії видів енергії в окремих функціональних класах електромеханічних систем технологічного призначення.

Ключові слова: електромеханічні об'єкти; принцип інверсії; види інверсії; породжувальна система; електромагнітна хромосома; генетичний код; генетичне передбачення; інноваційний синтез; технічна еволюція.

Рис.: 13. Бібл.: 21.

Актуальність теми дослідження. Інверсія належить до категорії універсальних закономірностей, які визначають структурну організацію, поведінку і функціонування складних систем як природного, так і антропогенного походження. Методи інверсії широко застосовуються при розв'язанні прямих і зворотних задач у математиці, в пошукових задачах евристичного синтезу й ухвалення рішень, в оборотних обчисленнях і алгоритмах програмування, у системах керування динамічними процесами, у психології сприйняття та мислення та ін. Поняття інверсії є предметом міждисциплінарних досліджень у системній генетиці, фізиці, хімії, математиці, квантовій механіці, лінгвістиці, філософії, музиці, метеорології, кристалографії, геології та інших наукових дисциплінах (рис. 1). Перетворення інверсії безпосередньо пов'язано з операцією симетрії, тому інверсія проявляється як на мікро-, так і на макрорівнях і має статус фундаментального фізичного принципу, який визначає процеси перетворення енергії, речовини, простору та часу.

Принцип інверсії належить до системних принципів структурної організації електромеханічних перетворювачів енергії, який визначає їхні електромагнітні, структурні й функціональні властивості. Такі важливі для електромеханіки поняття, як періодичне електромагнітне поле, просторова геометрія і топологія активних частин, структура полюсотвірних систем, вид просторового руху та ін., безпосередньо пов'язані з відповідними видами інверсії або їх комбінаціями. Необхідність системного аналізу прояву інверсії в електромеханічних об'єктах (ЕМ-об'єктах) визначається низкою причин. По-перше, інверсія належить до одного з фундаментальних принципів структурної

організації і функціонування об'єктів електромеханіки. Інверсія явище багаторівнєве, яке проявляється на генетичному, електромагнітному, енергетичному, структурному і функціональному рівнях організації ЕМ-об'єктів. По-друге, інверсія виступає одним з основних методологічних принципів генетичного структуроутворення електромеханічних об'єктів. По-третє, фактично недослідженими залишаються важливі аспекти умов виникнення і порушення інверсії, а також їх взаємозв'язки з елементно-інформаційним базисом породжувальної системи. Тому визначення рівнів, видів та особливостей прояву інверсії в структуроутворенні та функціонуванні об'єктів електромеханіки, на цей час, є актуальним науково-методологічним завданням.



Рис. 1. Принцип інверсії як предмет міждисциплінарних досліджень

Постановка проблеми. Інверсія – (від лат. *inversio* – перестановка, перевертання) – будь-яка пара елементів (процесів, явищ), які змінюють порядок свого розташування (орієнтованості, напрямку дії, полярності) на зворотній. Синонімами терміну «інверсія» є такі поняття, як зміна порядку, протилежність, оборотність, зворотність, реверс, перевертання, дзеркальність, інвертування тощо, які суттєво розширюють межі її проявів та зумовлюють неоднозначність його коректного тлумачення. Виходячи з визначення, поняття інверсії безпосередньо пов'язано з фундаментальним принципом електромеханічної взаємодії, що потребує їх спільного аналізу на хромосомному, електромагнітному, структурному та функціональному рівнях організації електромеханічних систем (ЕМ-систем).

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідження і вивчення видів інверсії в об'єктах електромеханіки фактично обмежуються аналізом явища оборотності електричних машин [1-3]. Переважна більшість публікацій із дослідження електричних машин та електромеханічних пристроїв, що функціонують на принципах інверсії, розглядаються їх авторами як спеціальні типи ЕМ-об'єктів, без їх безпосереднього зв'язку з принципом інверсії або його окремими видами. У науково-технічній літературі такі об'єкти відомі під різними термінологічними дефініціями: «двигуни із зовнішнім ротором», «двигуни оберненої конструкції», «двигуни коливального руху», «електричні машини (ЕМ) зворотно-обертального руху», «реверсивні двигуни» та ін. [4-8]. У генетично організованих системах принцип інверсії належить до п'яти фундаментальних принципів структурної організації (реплікації, схрещування, інверсії, кросинговеру і мутації), комбінаторика яких визначає процеси генетичного структуроутворення ЕМ-об'єктів [9].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Окремі аспекти генетичного аналізу і синтезу інверсних електромеханічних структур були опубліковані авторами в процесі розробки основних положень теорії генетичної еволюції ЕМ-систем. Огляду проявів просторової інверсії в електричних машинах присвячено роботу [10]. Проте системних досліджень і наукових узагальнень стосовно систематизації і аналізу видів інверсії в структурній організації і функціонуванні ЕМ-об'єктів, не виявлено. Фактично відсутні публікації щодо пояснення генетичної природи принципу інверсії та його місця в методології генетичного структуроутворення складних ЕМ-систем. Важливим є дослідження зв'язку видів інверсії з елементно-інформаційним базисом генетичної класифікації (ГК) первинних джерел електромагнітного поля. Як відомо, інваріантність фізичних законів щодо перетворень симетрії інверсії може порушуватись у структурах і явищах, зумовлених слабкою електромагнітною взаємодією [11; 12]. Тому важливим напрямом структурно-системних досліджень, яке становить самостійне наукове завдання, є системний аналіз причинно-наслідкових фізичних явищ, які виникають в ЕМ-об'єктах за умови порушення інверсійної симетрії.

Мета роботи. Метою цього дослідження є визначення і класифікація видів інверсії, а також аналіз особливостей їх прояву на генетичному, структурному і функціональному рівнях організації електромеханічних перетворювачів енергії. Методологічну основу дослідження становлять методи генетичного аналізу елементно-інформаційного базису системної моделі структуроутворення ЕМ-об'єктів, функцію якої виконує періодична структура ГК [9]. Достовірність результатів генетичного моделювання перевірялася постановкою еволюційних експериментів в межах відповідних класів інверсних ЕМ-об'єктів.

Виклад основного матеріалу. Спільний аналіз фундаментальних принципів електромеханічної взаємодії і генетичних принципів структуроутворення об'єктів електромеханіки дозволяє визначити ієрархію рівнів структурно-інформаційної організації ЕМ-систем, яка є характерною для генетично організованих систем (рис. 2).

В ієрархії рівнів складності ключову роль відіграє рівень породжувальних електромагнітних структур, представлений в ГК кінцевою множиною батьківських електромагнітних хромосом (Cr). Системним носієм універсальних генетичних кодів породжувальних електромагнітних хромосом виступає періодична структура ГК. Генетична інформація елементного базису (просторова геометрія, магнітна симетрія і топологія), інваріантна відносно складності ЕМ-об'єктів, часу їх еволюції і функціональної приналежності, визначає межі структуроутворення вищих рівнів складності (рис. 2). Функцію фізичних носіїв генетичних кодів виконують ЕМ-об'єкти.



*Рис. 2. Рівні структурної організації електромеханічних систем
(Cr – хромосомний рівень, представлений породжувальними джерелами електромагнітного поля (електромагнітними хромосомами))*

За результатами аналізу генетичних програм структуроутворення і постановки еволюційних експериментів у структуроутворенні інверсних ЕМ-об'єктів мають місце наступні види інверсії (рис. 3):

- хромосомна інверсія (I_C), яка зумовлена інверсією вектору магнітної орієнтованості батьківської електромагнітної хромосоми;
- інверсія видів енергії (I_E), яка відома як принцип оборотності електричних машин;
- електромагнітна інверсія (I_{EM}), яка пов'язана зі зміною напрямку (полярності, зворотної орієнтації) векторів електромагнітних величин (струмів, магнітних потоків, результуючих магнітних полів тощо);
- просторова інверсія (I_R), яка зумовлена наявністю двох або більше активних частин і необхідністю їх узгодженої орієнтованості;
- інверсія руху (I_M), яка безпосередньо пов'язана зі зміною напрямку поступального (I_{MV}), обертального ($I_{M\omega}$) або складного просторового руху (наприклад, гвинтового) на зворотний;
- комбіновані інверсії, які представлені сукупною дією їх декількох видів.



Рис. 3. Класифікація видів інверсії в електромеханічних об'єктах

Зазначені види інверсії інваріантні відносно принципу дії, складності ЕМ-системи, її функціональної приналежності і проявляються на різних рівнях структурної організації ЕМ-систем:

- на рівні первинних джерел електромагнітного поля – хромосомна інверсія;
- на рівні активних частин і елементів ЕМ-об'єктів (провідників зі струмом, секцій розподілених обмоток, полюсних систем індукторів, якорів, роторів, вторинних частин) – електромагнітна і просторова інверсії;
- на об'єктному, видовому, родовому та макросистемному рівнях – інверсія видів енергії, електромагнітна, просторова, інверсія руху та їх комбіновані види.

Кожен з основних видів інверсії за способом їх технічної реалізації поділяється на підвиди. Наприклад, електромагнітна інверсія є узагальненою щодо її підвидів: інверсії результуючого електромагнітного поля, магнітної та електричної інверсії (напряму, полярності) в машинах постійного струму і синхронних машинах з електромагнітним збудженням, а також їх комбінованих підвидів. Інверсія руху може бути конкретизована аналізом зворотно-обертального та зворотно-поступального руху.

Хромосомна інверсія. За результатами аналізу елементно-інформаційного базису періодичної структури ГК вперше виявлено первинні джерела поля, характерною властивістю яких є наявність інверсії вектора орієнтованості на рівні батьківських хромосом. Орієнтованість є одним з основних топологічних інваріантів магнітної поверхні, яка

визначається третьою складовою універсальних генетичних кодів. Інверсія хромосомного рівня має місце лише в тих первинних джерелах магнітного поля, просторова геометрія яких допускає наявність зон (ділянок) електромагнітних хромосом із зустрічною орієнтованістю результуючого магнітного поля. На елементному базисі першого великого періоду ГК, такими властивостями наділені всі гомологічні хромосоми підгрупи 0.0x, а також хромосома *PL 0.2y* підгрупи 0.2y:

$$N_{SG} = \langle CL\ 0.0x; KN\ 0.0x; PL\ 0.0x; TP\ 0.0x; SF\ 0.0x; TC\ 0.0x \rangle \subset H_{00x}. \quad (1)$$

Хромосомна інверсія представлена також на рівні джерел-ізоотопів, генетична інформація яких визначає структурний потенціал ЕМ-об'єктів-близнюків [13]. Слід зазначити, що гомологічні хромосоми підгрупи 0.0x не використовуються в структуроутворенні електричних машин з огляду на топологічну замкненість їх активного об'єму. Але наявність граничної електромагнітної симетрії, відсутність кінцевих електромагнітних ефектів і можливість максимального використання активного об'єму структурних представників підгрупи 0.0x відкриває широкі можливості для синтезу ЕМ-об'єктів, функціонування яких пов'язано з електропровідними дискретними, рідинними, іонізованими або біологічними вторинними середовищами.

Специфіка хромосоми *PL 0.2y* визначається тим, що за груповими властивостями (електромагнітною симетрією і топологією) вона є гомологічною до хромосоми домінуючого виду циліндричних ЕМ-об'єктів обертального руху, за винятком того, що її просторова геометрія наділена властивостями Роду плоских. Це єдиний базовий вид підгрупи 0.2y, структури якого характеризуються топологічною інверсією хромосомного рівня (рис. 4). До 2009 р. інформація стосовно наявності ЕМ-об'єктів даного виду в технічній еволюції була відсутня, а інформація батьківської хромосоми була представлена лише у вигляді генетичного коду. У теорії генетичного структуроутворення такі хромосоми визначають потенційну структуру неявних видів. Принципова відмінність неявних видів полягає в тому, що їхні генетичні коди присутні в структурі макрогенетичних програм, але їхні структурні представники ще відсутні в технічній еволюції. Результати передбачення стали вихідною інформацією для синтезу конкурентоспроможних технічних рішень нового покоління однообмоткових дезінтеграторів зі 100 % використанням активного об'єму, призначених для виробництва високоякісних гомогенних порошкових сумішей нанорозмірного діапазону крупності (рис. 4).

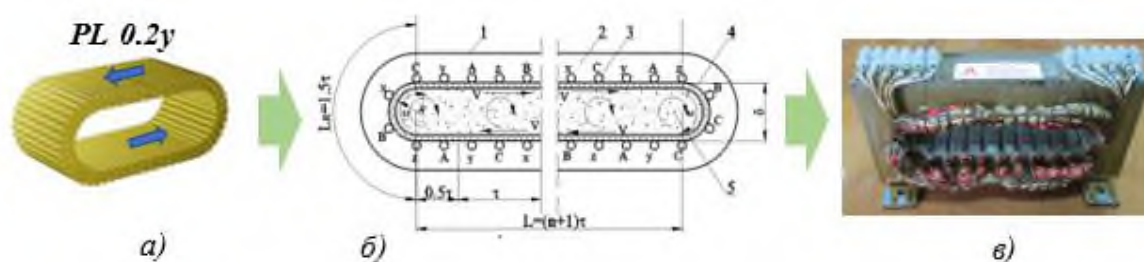


Рис. 4. Послідовність процедур генетичного синтезу ЕМ-об'єктів з хромосомною інверсією: а – батьківська електромагнітна хромосома; б – генетично синтезована структура однообмоткового дезінтегратора; в – індуктор електромеханічного дезінтегратора (представник виду *PL 0.2y*)

Унікальність ЕМ-об'єктів виду *PL 0.2y* визначається комбінаторикою складових його генетичної інформації, яка визначає системні властивості структур-нащадків:

- топологією замкненої магнітної системи;
- однообмотковим виконанням активної поверхні;
- наявністю активного об'єму із зустрічною орієнтацією електромагнітного поля;

- відсутність поздовжніх первинних електромагнітних ефектів;
- можливістю технічної реалізації структур як із зовнішньою, так і з внутрішньою активною поверхнею;
- можливістю багатороторного виконання з перетворенням енергії інверсних біжучих магнітних полів у механічну енергію обертання елементарних роторів;
- можливістю перетворення магнітної енергії інверсного біжучого магнітного поля в електромеханічних пристроях для безпосереднього здійснення технологічних процесів (електромеханічних дезінтеграторів, змішувачів електропровідних рідин та сумішей тощо);
- широкою функціональною адаптивністю.

Інверсія видів енергії. Принцип інверсії знаходить своє відображення в перетвореннях і взаємоперетвореннях різних видів енергії. Інверсія процесів перетворення енергії в ЕМ-об'єктах відома в електромеханіці як явище оборотності електричних машин (відкрите німецьким фізиком Е. Ленцем у 1833 р.). Оборотність електричних машин (за умови збереження їх структури) є прикладом прояву системного принципу інверсії в процесах перетворення відповідних видів енергії: механічної (W_M), магнітної (W_H), теплової (W_T), електричної (W_E), що забезпечує можливість їх функціонування як у режимах генерування (W_G), так і споживання (W_C) електричної енергії:

$$(W_M \rightarrow W_H \rightarrow W_T \rightarrow W_E)_G \leftrightarrow (W_E \rightarrow W_H \rightarrow W_T \rightarrow W_M)_C \quad (2)$$

Аналогічно інверсія видів енергії проявляється в інерційних накопичувачах енергії [14]: «електрична енергія» $\rightarrow$ «магнітна енергія» $\rightarrow$ «теплова енергія» $\rightarrow$ «енергія інерції ротора - маховика» (режим накопичення кінетичної енергії); «енергія інерції маховика» $\rightarrow$ «магнітна енергія» $\rightarrow$ «теплова енергія» $\rightarrow$ «електрична енергія» (режим споживання електричної енергії):

$$W_E \rightarrow W_M \rightarrow W_T \rightarrow W_I \leftrightarrow W_I \rightarrow W_M \rightarrow W_T \rightarrow W_E \quad (3)$$

Оборотність енергетичних процесів має місце також у перетворювачах, які функціонують на принципах п'єзоефекту та піроефекту. П'єзоелектричний ефект спостерігається в анізотропних діелектриках, переважно в кристалах деяких речовин, які характеризуються досить низьким рівнем симетрії. П'єзоефект супроводжується виникненням електричних зарядів (п'єзоелектрики) на гранях деяких кристалів при їхній деформації (прямий п'єзоефект), або виникненням деформації цих кристалів внаслідок дії електричного поля (зворотний п'єзоефект) [15].

З використанням принципу оборотності енергії функціонують такі класи ЕМ-систем як стартер-генератори, мотор – генератори потужних вітроагрегатів, гідрогенератори – двигуни гідроакумуючих електростанцій та ін.

Просторова інверсія пов'язана з перетворенням симетрії, яке змінює порядок розташування довільної пари електромагнітно орієнтованих елементів на зворотній. Виходячи з визначення, необхідними умовами реалізації принципу просторової інверсії в ЕМ-об'єктах є такі:

- наявність не менше двох ($N \geq 2$) магнітно орієнтованих і електромагнітно пов'язаних активних частин (полісів, індукторів, якорів, статорів, роторів);
- можливість зміни їх просторового розташування у протилежному (зворотному) порядку.

Відомим прикладом прояву просторової інверсії в структуроутворенні електричних машин обертального руху є інверсія на рівні їх основних активних частин. Наприклад, у синхронних машинах переважно знаходить застосування компонування схема, у якій обмотка якоря розташовується на статорі, а обмотка збудження – на роторі (рис. 5, а). Але

в машинах невеликої потужності, зокрема з магнітоелектричним збудженням, іноді застосовують просторово інверсне виконання з розміщенням обмотки якоря на роторі, а обмотки збудження – на полюсах статора (рис. 5, б).

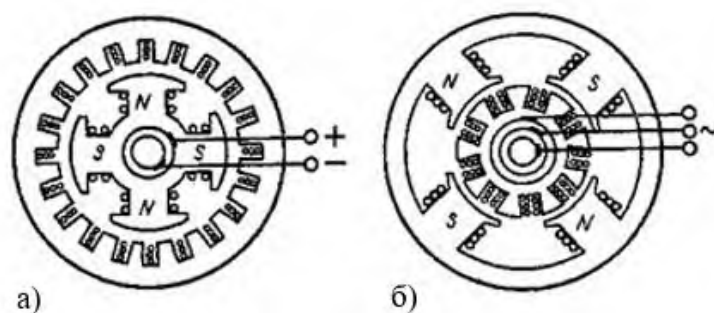


Рис. 5. Принцип просторової інверсії в конструкції явнополюсних синхронних машин обертового руху (вид CL 0.2y): а – з нерухомим якорем; б – з обертовим якорем

Макрогенетична програма обертових машин, структури яких допускають функціонування з просторовою інверсією активних частин, визначається топологією і просторовою геометрією елементного базису в межах першого великого періоду ГК:

- Рід циліндричних:

$$G_{CL} = (CL\ 0.0y, CL\ 0.2y, CL\ 2.2y), \quad (4)$$

- Рід конічних:

$$G_{KN} = (KN\ 0.0y, KN\ 0.2y, KN\ 2.2y), \quad (5)$$

- Рід тороїдних плоских:

$$G_{TP} = (TP\ 0.0y, TP\ 0.2y, TP\ 2.2y), \quad (6)$$

- Рід сферичних:

$$G_{SF} = (SF\ 0.0y, SF\ 0.0x, SF\ 0.2y, SF\ 2.0x, SF\ 2.2y, SF\ 2.2x), \quad (7)$$

- Рід тороїдних циліндричних:

$$G_{TC} = (TC\ 0.0y, TC\ 0.2y, TC\ 2.2y). \quad (8)$$

Домінуючим видом електричних машин обертового руху є вид циліндричних машин з поверхневими обмотками CL 0.2y. В адаптивній еволюції даного виду широко представлені об'єкти з просторовою інверсією на рівні основних активних частин – статора і ротора. Просторова інверсія не «чутлива» до принципу дії, роду струму і типу ЕМ. Доцільність її застосування визначається лише в процесі структурно-параметричної адаптації до вимог та умов функціонування.

Широке використання принципу просторової інверсії спостерігається в структуроутворенні електричних машин поступального руху. Відомими представниками просторово інверсних структур є:

- тягові лінійні електродвигуни з активною шляховою структурою (з рухомими і нерухомими індукторними системами (рис. 6);
- лінійні плоскі двигуни з двосторонніми статорами;
- плоскі і циліндричні індуктори з кільцевою розподіленою обмоткою і зовнішнім розташуванням вторинних елементів.

З погляду генетичної схильності до утворення просторово інверсних структур на рівні основних активних частин ЕМ-об'єкта, такими властивостями наділені всі види ЕМ-структур, родова геометрія яких характеризується від'ємною та нульовою кривизною Гауса.

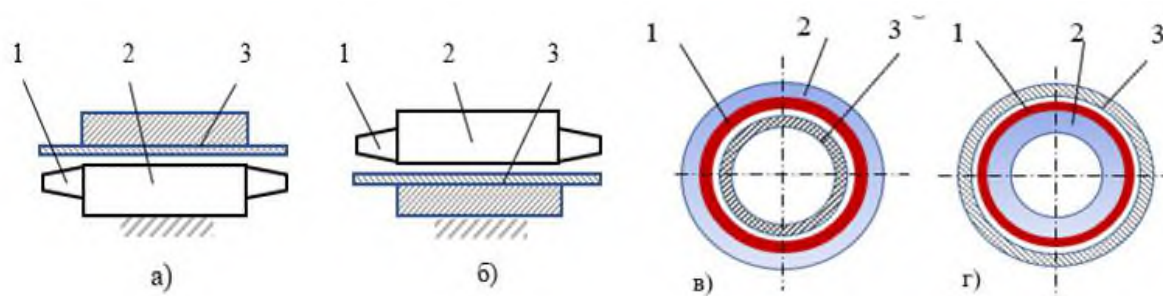


Рис. 6. Просторово інверсні компоновальні схеми в електричних машинах поступального руху: а, б – представники виду плоских ЕМ (PL 2.2х); в, г – структури виду циліндричних ЕМ (CL 2.0х): з нерухомим і рухомих індуктором; 1 – розподілена обмотка; 2 – магнітопровід індуктора; 3 – вторинна частина

Системною властивістю структурних представників виду плоских електричних машин виду PL 2.0х є наявність кільцевої розподіленої обмотки, поперечна симетрія індукторів з дво-, три- та чотирьохсторонньою активною зоною і інверсним (зовнішнім) розташуванням вторинного елемента (рис. 7, б, в, г). Слід зазначити, що в ЕМ-об'єктах поступального руху, за здавалось би наочною простотою компоновальних схем (рис. 7), приховані принципово різні (структурно, технічно й економічно) системи тягового електроприводу, вибір і практичне використання яких потребує відповідних проектних і техніко-економічних обґрунтувань.

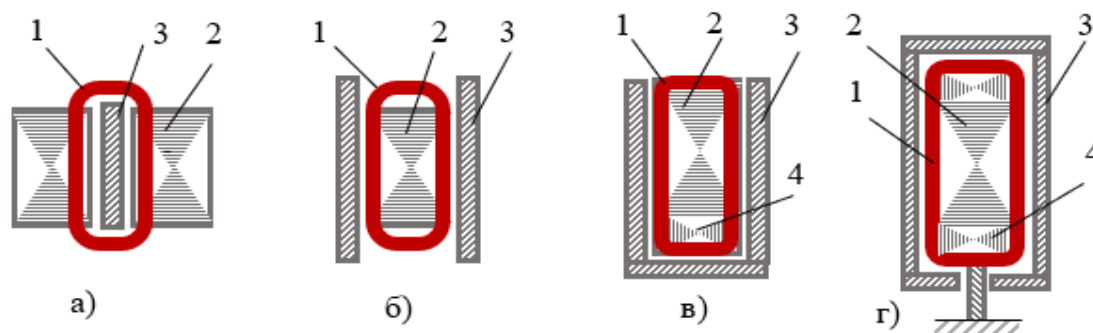


Рис. 7. Варіанти формування активної зони електричних машин поступального руху роду плоских з розподіленою кільцевою обмоткою (представники виду PL 2.0х): а – з внутрішнім вторинним елементом; б, в, г – з зовнішнім (інверсним) вторинним елементом; 1 – кільцева обмотка; 2 – магнітопровід індуктора; 3 – вторинний елемент; 4 – додатковий магнітопровід

Просторова інверсія представлена не тільки на рівні основних активних частин (якорів, індукторів, роторів, вторинних елементів), але й на рівні обмоток електричних машин. Такі машини відомі під назвою індукторних, в конструкції яких і обмотка якоря, і обмотка збудження знаходяться на якорі, а ротор виконується безобмотковим, явнополюсним.

Електромагнітна інверсія. Електромагнітна інверсія є домінуючим видом інверсії, який представлено на всіх рівнях структурної організації ЕМ-об'єктів, починаючи з хромосомного. Всі інші види інверсії (енергетична, просторова, інверсія руху) можуть існувати лише в ЕМ-структурах об'єктного та вищих рівнів організації (рис. 8).

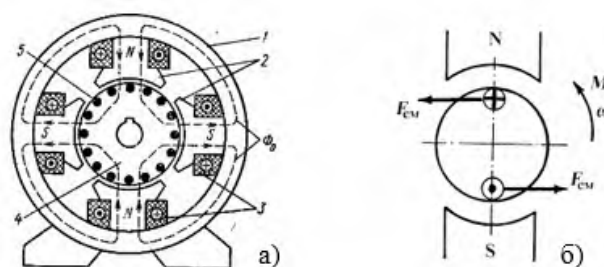


Рис. 8. Електромагнітна інверсія в електричних машинах:

а – контури замикання основного магнітного потоку; б – струму й електромагнітних сил

Властивість електромагнітної інверсії проявляється на різних рівнях складності та функціональної приналежності ЕМ-об'єктів. Біфілярні обмотки, протилежний напрям струмів у секціях і сполучних шинопроводах, зустрічне обертання роторів у багатороторних електричних машинах, протилежний порядок чергування фаз в багатофазних пристроях, індукційне екранування, зустрічні магнітні потоки в магнітних системах – далеко не повний перелік проявів і численних способів їх технічної реалізації, які мають безпосереднє відношення до електромагнітної інверсії.

Принцип електромагнітної інверсії є визначальним для функціонування спеціальних класів ЕМ-систем, які виникли в процесі адаптивної еволюції. До таких об'єктів, принцип дії яких неможливий без наявності біжучих, або обертових зустрічних магнітних полів, належать:

- плоскі двигуни для безредукторного приводу конвеєрів і транспортерів;
- багатороторні ($N_R > 4$) електродвигуни спеціального призначення;
- електромеханічні дезінтегратори з дискретними феромагнітними робочими тілами для безпосереднього здійснення технологічних процесів;
- багатообмоткові індукторні системи для електромагнітного змішування рідких металів і електропровідних рідинних сумішей;
- ЕМ з реверсуванням магнітного потоку постійних магнітів, та ін.

Інверсія просторового руху – передбачає зміну певного виду просторового руху на протилежний. Системи і ЕМ-об'єкти, які функціонують з інверсним рухом, широко використовуються в електроприводі літальних апаратів, гребних гвинтів, гідронасосів, в конструкціях вітрогенераторів, магнітних редукторів тощо. Для окремих функціональних класів ЕМ-об'єктів інверсія руху виступає необхідною умовою їх функціонування (в спеціальних електромашинних агрегатах з обертовим статором, роторів у дво- та багатороторних електричних машинах, у двигунах зворотно-поступального та зворотно-обертального руху, в багатороторних двигунах, та ін.) (рис. 9).

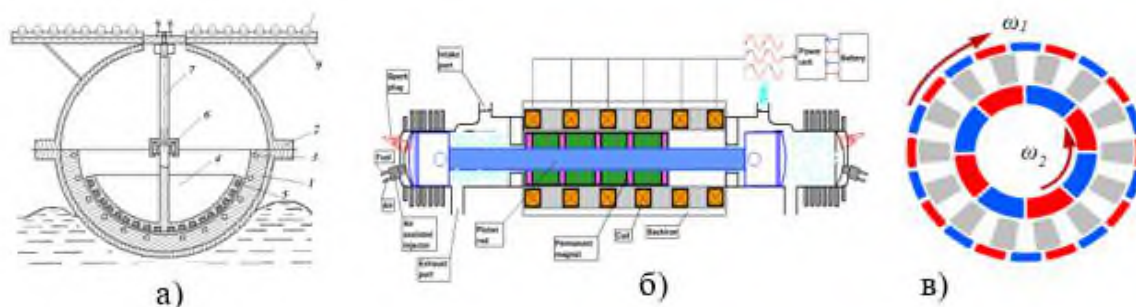


Рис. 9. Електромеханічні об'єкти, які функціонують з використанням інверсії просторового руху:

а – генератор коливального руху морського буя;
б – лінійний генератор вільнопоршневого теплового двигуна; в – магнітний редуктор

Поняття інверсії руху безпосередньо пов'язано з широко відомим і багатозначним термінологічним поняттям «реверс». Реверс (англ. reverse, лат. reversus – «зворотний») означає зміну руху механізму (пристрою, рухомої частини, процесу) на зворотний, протилежний. Загальновідомо, що в реверсивних електродвигунах реалізації зворотного руху передують певний вид електромагнітної інверсії. Наприклад, зміну обертання валу ротора можна отримати при зміні полярності струму обмотки збудження або обмотки якоря (у двигунах постійного струму), або зміною порядку чергування фаз (у двигунах змінного струму). Однак зазначене ствердження є коректним лише для параметричних способів керування, які широко використовуються в електричних машинах.

Існують також структурні способи реалізації реверсивного руху, які дозволяють отримати безконтактний реверс без зміни електричних параметрів. За результатами аналізу макрогенетичних програм виявлено електромагнітні хромосоми, які наділені повотною симетрією активних частин ЕМ-об'єкта відносно нормальної осі OZ [16]. Можливість практичної реалізації безкомутаційного способу допускають лише представники двох видів ПЛ 2.2х,у і СФ 2.2х,у, генетичні коди яких «не чутливі» до відносної орієнтації активних частин за умови збереження $(U, f, \delta) = \text{const}$ (рис. 10).

Наявність зазначеної генетичної аномалії дозволяє реалізувати спосіб плавної зміни частоти обертання ротора (або швидкості поступального руху ВЕ), з можливістю реверсу двигуна, шляхом OZ -повороту статора відносно активної поверхні рухомої частини (в межах просторового кута $\alpha = (0 \div \pi)$) з можливістю реверсу. Для асинхронних двигунів з дуговим статором зазначений спосіб вперше був запатентований у 1945 р. [17]. Пізніше були запатентовані інші технічні реалізації даного способу.



Рис. 10. Безконтактний спосіб просторово адаптивного регулювання швидкості і реалізації реверсивного руху в модульних двигунах:
а – обертального руху (SF 2.2х,у); б – поступального руху (PL 2.2х,у)

Спосіб реалізації реверсивного руху для зазначених видів ЕМ-об'єктів (рис. 10) інваріантний до кривизни Гауса і може бути реалізований в конструкціях двигунів як з нульовою (PL 2.2х,у), так і позитивною та від'ємною кривизною активної поверхні (SF 2.2х,у).

Комбіновані види інверсії. Функціонування переважної більшості ЕМ-об'єктів з мutowаною структурою, а також об'єктів двійникових видів, забезпечується комбінуванням різних видів інверсії, які моделюються відповідними операторами генетичного синтезу.

Процеси адаптивного структуроутворення окремих функціональних класів електричних машин моделюються більш складними алгоритмами з використанням операторів гібридизації, інверсії та мутації. Наочним прикладом технічної реалізації таких комбінаторних структур є функціональні класи електричних машин з явно вираженим мутаційним ефектом (двигуни з ротором, що котиться, тягові лінійні двигуни, багатороторні ЕМ та ін.) [18].

У мutowаних структурах багатороторних асинхронних двигунів (АД), діаметри елементарних роторів яких значно менші за діаметр статора ($D_2 \ll D_1$), тому частота їх обертання перевищує синхронну швидкість магнітного поля статора (рис. 11). Генетичні структури таких двигунів є результатом комбінування операторів електромагнітної інверсії з операторами реплікації та структурної мутації їх рухомих частин (елементарних роторів):

$$C_{PL} = [2(PL\ 2.2y) : R_{ZOX} : I_R : I_{EM}]_1 \times 7[(CL\ 0.2y) : M_D : R_{ZOX}]_2 \subset S_{22y} \quad (9)$$

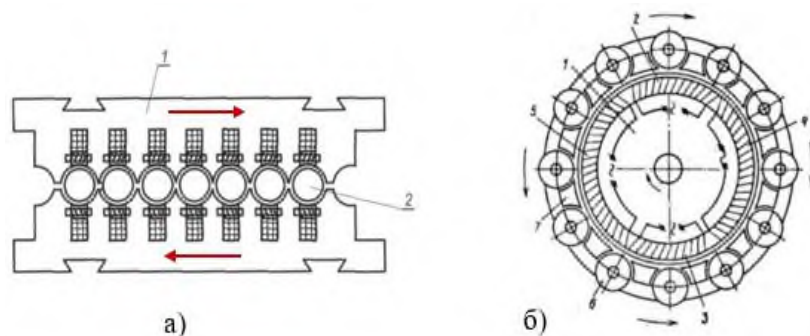


Рис. 11. Багатороторні асинхронні двигуни – представники мутованих об'єктів з комбінованими видами інверсії: а – з електромагнітною інверсією індукторів (представник виду 2PL 2.2у); б – з просторовою, електромагнітною та інверсією обертового руху елементарних роторів (представник виду 4CL 2.2у)

Конструкція багатороторного АД обертового руху (рис. 11, б) поєднує три види інверсії: просторову (зовнішнє розташування елементарних роторів відносно активної поверхні статора); електромагнітну інверсію секціонованої поверхневої обмотки статора; інверсію обертового руху 4-х груп елементарних роторів. Рівень генетичної складності багатороторного двигуна (рис. 11, б) можна описати такою структурною формулою:

$$C_{CL} = [4(CL\ 2.2y) : R_{ZOV} : I_R : I_{EM}]_1 \times 12[(CL\ 0.2y) : M_D : R_{ZOV} : I_{\omega}]_2 \subset S_{22y} \quad (10)$$

Наявність електромагнітної інверсії на хромосомному рівні є достатньою умовою для синтезу ЕМ-структур з комбінованими видами інверсії. В процесі структурної адаптації (ускладнення) зазначених активних поверхонь, шляхом комбінування з вторинними активними частинами, нескладно передбачити їх генетичну схильність до розширення простору структуроутворення з утворенням відповідних структурних варіантів.

Генетичний аналіз банку даних джерел ізотопів засвідчує, що властивістю хромосомної інверсії будуть наділені всі структури першого покоління з уорієнтованістю, в межах підгруп 0.2у і 2.2у:

$$N_I = ({}^1CL\ 0.2y, {}^1CL\ 2.2y, {}^1KN\ 0.2y, {}^1KN\ 2.2y, {}^1PL\ 0.2y, {}^1PL\ 2.2y, {}^1TP\ 0.2y, {}^1TP\ 2.2y, {}^1SF\ 0.2y, {}^1SF\ 2.2y, {}^1CL\ 0.2y, {}^1CL\ 2.2y) \quad (11)$$

Синтезовані на основі джерел-ізотопів близнюкові ЕМ-об'єкти будуть суміщувати електромагнітну інверсію в комбінуванні з просторовою та інверсією руху (рис. 12).

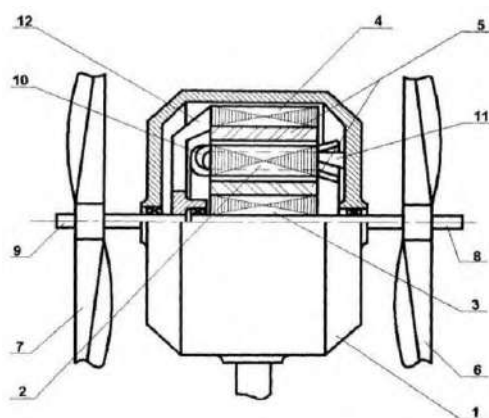


Рис. 12. Гібридний електромеханічний агрегат (представник Виду-близнюка ${}^1CL\ 0.2y$) з комбінованими видами інверсії

Синтезований варіант однообмоткового синхронного двороторного двигуна (рис. 12) поєднує три види інверсії: просторову I_R (наявність зовнішнього ротора); електромагнітну I_{EM} (кросингвер фаз C розподіленої обмотки-близнюка і зустрічні обертові магнітні поля на внутрішній і зовнішній активній поверхні статора); інверсію руху I_ω (зустрічний обертальний рух внутрішнього і зовнішнього роторів та, відповідно, правого і лівого аеродинамічних гвинтів). Рівень генетичної складності двороторного двигуна (рис. 12) визначається структурною формулою:

$$C = [({}^1CL\ 0.2y) : C : I_{EM}]_1 \times 2[(CL\ 0.2y) : R_{OZ} : I_R : M : I_\omega]_2 \times 2(M_{AS})^{-1} \subset G_{CL} \quad (12)$$

За результатами досліджень, на кафедрі електромеханіки (ФЕА) і кафедрі конструювання машин (ММІ) КПІ ім. Ігоря Сікорського, синтезовано, розроблено і вперше введено в еволюцію конкурентоспроможні ЕМ-об'єкти близьюкових видів з комбінованими видами інверсії (рис. 13) [13].

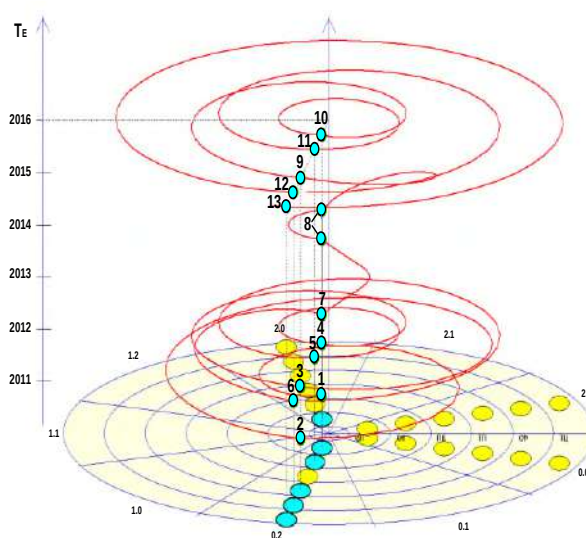


Рис. 13. Еволюційна траєкторія цілеспрямованого введення в еволюцію ЕМ-об'єктів близьюкових видів із комбінованими видами інверсії ($T_E = 5$ років)

Структурний потенціал видів-близнюків, який на декілька порядків перевищує можливості базових видів, становить потужне джерело структуроутворення і технічних інновацій, які визначають новий напрям структурно-системних досліджень в електромеханіці.

Порушення принципу інверсії. Симетрія фізичних законів відносно просторової інверсії є свідченням їх незмінності при заміні правого на ліве, а лівого на праве. Проте інваріантність фізичних законів щодо інверсії може порушуватись у явищах, зумовлених слабкою взаємодією. Процеси адаптивного еволюційного структуроутворення супроводжуються поступовою втратою симетрії ЕМ-структур у порівнянні з симетрією породжувальної структури [10; 19]. В окремих функціональних класах ЕМ-об'єктів, принцип оборотності стає не еквівалентним, або суттєво порушується. Такі об'єкти практично можуть функціонувати лише в односторонньому режимі. Порушення принципу інверсії енергії в ЕМ-об'єктах можливо за умови порушення магнітної симетрії. До магнітно асиметричних систем передусім належать об'єкти з явновираженою мутованою просторовою геометрією і структурою активних частин [18]. Прикладами таких систем є функціональні класи електромеханічних систем для безпосереднього здійснення технологічних процесів (електричні двигуни з ротором, що котиться, магнітні сепаратори, електромеханічні дезінтегратори, багатороторні двигуни та ін.), функціонування яких реалізується лише за напрямом перетворення електричної енергії в механічну.

Положення теорії генетичної еволюції ЕМ-систем дозволяють визначити умови і встановити діагностичні критерії, які зумовлюють порушення принципу оборотності в структурній організації електромеханічних систем і пристроїв. До складу таких критеріїв відносяться:

- мутована структура основних активних частин (наприклад, у багатороторних ($N_2 \geq 4$) електродвигунах);
- критичне порушення електромагнітної симетрії ЕМ-об'єкта;
- критичне порушення співвідношення (площі і геометрії) активних поверхонь $(S_A)_2 \ll (S_A)_1$ (наприклад, у магнітних сепараторах, електромеханічних дезінтеграторах);
- фізичний стан і електромагнітні властивості вторинного середовища (дискретного, рідини, плазми, біологічного).

Проблема порушення інверсії потребує організації подальших досліджень, що зумовлено можливістю відкриття нових фізичних явищ і ефектів. Одним із результатів таких досліджень за даною проблематикою, стало відкриття австрійськими фізиками явища магнітного діода [20]. За аналогією принципу дії електричного діода, магнітний діод забезпечує передачу магнітного поля, між двома взаємопов'язаними індуктивними контурами, лише за одним з напрямів. Очікується, що це відкриття забезпечить нові можливості для створення технологій, заснованих на магнітно-зв'язаних елементах. Аналогічне відкриття в галузі акустичної інверсії здійснено китайськими вченими, які виготовили перший прототип акустичного ізолятора Черна, у якому звукові хвилі втрачають оборотність, але забезпечують їх топологічний захист [21]. Дослідження топологічних ізоляторів актуальні для створення квантових комп'ютерів, які не припуститися помилок під час обчислень завдяки топологічному захисту кубітів.

Висновки. У статті узагальнено результати досліджень з визначення і генетичного аналізу видів інверсії в структурній організації та функціонуванні електромеханічних перетворювачів енергії.

1. Показано, що інверсія належить до категорії універсальних закономірностей, які визначають структурну організацію, поведінку і функціонування складних систем як природного, так і антропогенного походження. Поняття інверсії безпосередньо пов'язано з фундаментальним принципом електромеханічної взаємодії, просторовою структурою і топологією полюсотвірних активних поверхонь, орієнтованістю векторних електромагнітних величин, режимами функціонування та видами просторового руху ЕМ-об'єктів.

2. Уперше визначено рівні і особливості прояву інверсії в ЕМ-об'єктах, що дозволило запропонувати класифікацію видів інверсії, які визначають генетичні, енергетичні, електромагнітні, геометричні, структурні і динамічні властивості електричних машин та електромеханічних пристроїв, незалежно від рівня їхньої складності і функціонального призначення.

3. Вперше теоретично й експериментально доказано, що принципи просторової і комбінованої інверсії розповсюджуються також на ЕМ-об'єкти близнюкових видів, структурний потенціал яких визначається генетичною інформацією електромагнітних джерел-ізополюсів.

4. На конкретних прикладах показано, що в методології генетичного синтезу, перетворення інверсії виступає як один з п'яти основних системних принципів генетичного структуроутворення, який у сукупності з іншими принципами, визначає структурну організацію і еволюцію електромеханічних перетворювачів енергії.

Результати дослідження є системною основою для розробки алгоритмів автоматизованого синтезу, розробки індивідуальних освітніх траєкторій і створення генетичних банків інновацій.

Список використаних джерел

1. Милях, А. Н., & Шидловский, А. К. (1967). *Принцип взаимности и обратимость явлений в электротехнике*. Наукова думка.
2. Бєлікова, Л. Я., & Шевченко, В. П. (2011). *Електричні машини*. Наука і техніка.
3. Sen, P. C. (2021). *Principles of electric machines and power electronics, international adaptation*. Wiley & Sons, Limited, John.
4. Блюмин, Г. З. (1977). *Двигатели с внешним ротором для высокоскоростного электропривода*. Энергия.
5. Вербовой, П. Ф., & Съянов, А. М. (1985). *Конструкции асинхронных двигателей с внешним ротором* [Рукопис подано до опублікування]. АН УССР.
6. Akinin, K., Kireyev, V., Petukhov, I., Filomenko, A., Lavrinenko, V., & Mikhailik, E. (2022). Дослідження впливу зміни параметрів безконтактних магніто-електричних двигунів зворотно-обертального руху на їх характеристики. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, (62), 025. <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.025>.
7. Collins, D. *External rotor motor basics: Design and applications*. (n.d.). Motion Control, Encoders, Servo Drives, Controllers – Motion Control Tips. <https://www.motioncontroltips.com/external-rotor-motor-basics-design-applications>.
8. Farag, M. (2013, June 19) *In-Wheel Brushless DC Outer Rotor (Hub) Motor Used in Electrically Driven Vehicles*. Home. <https://contest.techbriefs.com/2013/entries/transportation-and-automotive/3517>.
9. Шинкаренко, В. Ф. (2002). *Основи теорії еволюції електромеханічних систем*. Наукова думка.
10. Козігородський, В., Шинкаренко В. Ф. (наук. кер.). (2024). *Принцип просторової інверсії в структурній організації і еволюції електричних машин* [Магістерська дисертація]. КПП ім. Ігоря Сікорського.
11. Урманцев, Ю. А. (1974). *Симметрия природы и природа симметрии*. Мысль.
12. Мусієнко, Ю. А., & Горбачук, І. Т. (2001). Принципи симетрії та їх зв'язок з законами збереження у фізиці. *Наукові записки : Збірник наукових статей Національного педагогічного університету імені М. П. Драгоманова*, (43), 95–100. <http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/16152>.
13. Shynkarenko, V., & Kotliarova, V. (2017). Twin-objects and double-objects in the structural evolution of electromechanical energy converters. In *2017 international conference on modern electrical and energy systems (MEES)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248865>.
14. Li, X., & Palazzolo, A. (2022). A review of flywheel energy storage systems: State of the art and opportunities. *Journal of Energy Storage*, 46, 103576. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103576>.
15. Желудев, И. С. (1987). *Физика кристаллов и симметрия*. Наука.
16. Shynkarenko, V., Makki, A., Kotliarova, V., Shymanska, A., & Krasovskiy, P. (2020). Genetic organization and evolution of electromechanical objects with adaptive geometry of active zone. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 5(5), 512–525. <https://doi.org/10.25046/aj050564>.
17. Фридкин, П. А. (1945). Новый тип дугового статора для электропривода с малыми и регулируемым скоростями вращения. *Электричество*, (1, 2), 22–23.
18. Shynkarenko, V., Kotliarova, V., Monakhov, Y., & Krasovskiy, P. (2022). Structural mutations in adaptive evolution of electromechanical energy converters. *Technical Sciences and Technologies*, (2(28)), 111–126. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2\(28\)-111-126](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2(28)-111-126).
19. Эбелинг, В., Энгель, А., & Файстель, Р. (2001). *Физика процессов эволюции. Синергетический подход* (Ю. А. Данилова, Trans.). Эдиториал УРСС.
20. Prat-Camps, J., Maurer, P., Kirchmair, G., & Romero-Isart, O. (2018). Circumventing magnetostatic reciprocity: A diode for magnetic fields. *Physical Review Letters*, 121(21). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.121.213903>.
21. Ding, Y., Peng, Y., Zhu, Y., Fan, X., Yang, J., Liang, B., Zhu, X., Wan, X., & Cheng, J. (2019). Experimental demonstration of acoustic chern insulators. *Physical Review Letters*, 122(1). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.122.014302>.

References

1. Miliakh, A.N., Shidlovskii, A.K. (1967). *Printcip vzaimnosti i obratimost iavlenii v elektrotekhnike* [The Principle of Reciprocity and Reversibility of Phenomena in Electrical Engineering]. Naukova Dumka.
2. Bielikova, L.Ya., Shevchenko V.P. (2011) *Elektrychni mashyny* [Electric Machines]. Nauka i Tekhnika.

3. Sen, P. C. (2013). *Principles of Electric Machines and Power Electronics* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
4. Bliumin, G.Z. (1977). *Dvigateli s vneshnim rotorom dlia vysokoskorostnogo elektroprivoda* [Motors with an External Rotor for High-Speed Electric Drives]. Energiia.
5. Verbovoi, P. F., Sianov, A. M. (1985). *Konstruktsii asinkhronnykh dvigatelei s vneshnim rotorom* [Designs of Asynchronous Motors with an External Rotor]. Preprint – 417 IED AN USSR.
6. Akinin, K.P., Kireyev, V.G., Petukhov, I.S., Filomenko, A.A., Lavrinenko, V.A., Mikhailik, E.M. (2022). *Doslidzhennia vplyvu zminy parametriv bezkontaktnykh magnitno-elektrychnykh dvyhuniiv zvorotno-obertalnoho rukhu na yikh kharakterystyky* [Study of the Influence of Changing the Parameters of Brushless Magnetolectric Motors of the Return-Rotary Motion on Their Characteristics.] *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy – Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 62, 25–33. <https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.025>.
7. Collins, D. (2018, June 6). External rotor motor basics: Design and applications. *Motion Control Tips*. <https://www.motioncontroltips.com/external-rotor-motor-basics-design-applications>.
8. Farag, M. (2013, June 19). In-Wheel Brushless DC Outer Rotor (Hub) Motor Used in Electrically Driven Vehicles. *Transportation & Automotive*. <https://contest.techbriefs.com/2013/entries/transportation-and-automotive/3517>.
9. Shynkarenko, V.F. (2002). *Osnovy teorii evoliutsii elektromekhanichnykh system* [Fundamentals of the Theory of Evolution of Electromechanical Systems]. Naukova Dumka.
10. Kozigrodsky, V.A., Shynkarenko, V.F. (Scientific supervisor). (2024). *Pryntsyp prostorovoi inversii v strukturnii orhanizatsii i evoliutsii elektrychnykh mashyn* [The principle of spatial inversion in the structural organization and evolution of electric machines] [Master's thesis. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute].
11. Urmantsev, Iu.A. (1974). *Simmetriia prirody i priroda simmetrii* [Symmetry of Nature and the Nature of Symmetry]. Mysl.
12. Musiienko, Yu.A., Horbachuk, I.T. (2001). *Pryntsypy symetrii ta yikh zviazok z zakonamy zberezhenia u fizytsi* [Principles of symmetry and their connection with the laws of conservation in physics]. *Naukovi zapysky: zbirnyk naukovykh statei Natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni M. P. Drahomanova – Scientific Notes: Collection of Scientific Articles of the National Pedagogical University named after M. P. Drahomanov*, 43, 95–100. <http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/16152>.
13. Shynkarenko, V., Kotliarova, V. (2017). Twin-objects and Double-objects in the Structural Evolution of Electromechanical Energy Converters. In *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)* (pp. 116–119). <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248865>.
14. Li, X., Palazzolo, A. (2022). A review of flywheel energy storage systems: State of the art and opportunities. *Journal of Energy Storage*, 46, 103576. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103576>.
15. Zheludev, I.S. (1987). *Fizika kristallov i simmetriia* [Physics of crystals and symmetry]. Nauka.
16. Shynkarenko, V., Makki, A., Kotliarova, V., Shymanska, A., Krasovskyi, P. (2020). Genetic Organization and Evolution of Electromechanical Objects with Adaptive Geometry of Active Zone. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. Special Issue on Multidisciplinary Innovation in Engineering Science & Technology*, 5(5), 512–525. <https://doi.org/10.25046/aj050564>.
17. Fridkin, P. A. (1945). *Novyi tip dugovogo statora dlia elektroprivoda s malymi i reguliruemymi skorostiami vrashcheniia* [A new type of arc stator for an electric drive with low and adjustable speeds of rotation]. *Elektrichestvo – Electricity*, 1(2), 22–23.
18. Shynkarenko, V., Kotlyarova, V., Monakhov, E., Krasovsky, P. (2022). *Strukturni mutatsii v adaptivnii evoliutsii elektromekhanichnykh peretvoriuvachiv enerhii* [Structural mutations in adaptive evolution of electromechanical energy converters]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, 2(28), 111-126. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2\(28\)-111-126](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2(28)-111-126).
19. Ebeling, V., Engel, A., Faistel, R. (2001). *Fizika protsessov evoliutcii. Sinergeticheskii podkhod* [Physics of evolution processes. Synergetic approach]. Editorial URSS.
20. Prat-Camps, J., Maurer, P., Kirchmair, G., Romero-Isart, O. (2018). Circumventing magneto-static reciprocity: A diode for magnetic fields. *Physical Review Letters*, 121(21), 213903. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.213903>.

21. Ding, Y., Peng, Y., Zhu, Y., Fan, X., Yang, J., Liang, B., et al. (2019). Experimental demonstration of acoustic Chern insulators. *Physical Review Letters*, 122(1), 014302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.014302>.

Отримано 03.03.2025

UDC 621.313

Vasyl Shynkarenko¹, Anna Shymanska², Viktoriia Kotliarova³

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Electromechanics
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: svf1102@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5054-823X>

ResearcherID: [AAK-3777-2020](https://orcid.org/0000-0002-5054-823X). SCOPUS Author ID: 7005550726

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electromechanics
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: shym.anna@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2481-0908>

ResearcherID: [ABB-9534-2020](https://orcid.org/0000-0003-2481-0908). SCOPUS Author ID: 57202580817

³Senior Lecturer at the Department of Electromechanics
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: sharik_2004@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4182-4175>

ResearcherID: [AAK-3782-2020](https://orcid.org/0000-0002-4182-4175). SCOPUS Author ID: 57202578038

THE INVERSION PRINCIPLE IN THE STRUCTURAL ORGANIZATION AND EVOLUTION OF ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTERS

The fundamental nature of the inversion principle, which is the subject of interdisciplinary research, is analyzed. Attention is focused on the need for systematic analysis of types and manifestations of inversion in the structural organization and functioning of electromechanical objects. Based on the results of the analysis of genetic programs of the structure formation and the setting of evolutionary experiments, the structure of the main types of inversion is determined, and their classification is proposed. For the first time, genetic nature and features of manifestation of topological inversion at the chromosomal level are analyzed. It is shown that the area of existence of arbitrary types of inversion is determined by their macrogenetic programs. The genetic nature of invariant information connections of chromosomal, electromagnetic, spatial, dynamic inversions and their combinatorial variants, with the periodic structure of the genetic classification (generative system) of primary sources of the electromagnetic field, is analyzed. Specific examples show that each type of inversion determines principles of structure formation and structural evolution of the corresponding functional classes of electromechanical objects. The structural potential of inverted types-twins, which is considered as the potential source of the structure formation and technical innovations, is analyzed. The conditions for violation of the inversion of energy types in individual functional classes of electromechanical systems for technological purposes are considered.

Keywords: electromechanical objects; principle of inversion; types of inversion; generative system; electromagnetic chromosome; genetic code; genetic prediction; innovative synthesis; technical evolution.

Fig.:13. References: 21.

Гліб Миколайович Стрункін

магістр, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії «Промислова електроніка»,

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні

Запорізького національного університету, інженер ТОВ «Плутон ІС»

e-mail: strunkingleb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>. ResearcherID: LNQ-2155-2024

**ОБМЕЖУВАЧ НАПРУГИ ДЛЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ
МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ**

Наведено відомості про сучасний стан із рухомим складом міських електротранспортів східної Європи. Показано, що через наявність в експлуатації рухомого складу з істотно різними технічними параметрами, можливий вихід із ладу вагонів із найменшими максимальними значеннями параметрів унаслідок виникнення перенапруг через гальмування. У результаті заборони на генерацію електроенергії в мережу середньої напруги і через високу вартість накопичувачів єдиною можливістю боротьби з перенапругою залишається дисипативний спосіб. При цьому способі надлишкова енергія гальмування розсіюється на стаціонарних резисторах, які розташовано на тяговій підстанції. Презентовано роботу транзисторного обмежувача напруги, який було застосовано в міськелектротрансі Ораді та Дніпро. За допомогою методів штучного інтелекту було отримано оцінювання по використанню енергії гальмування для опалювання приміщення для підвищення енергоефективності системи.

Ключові слова: енергія гальмування; транзисторний ключ; стаціонарний резистор; теплоаккумулятор; ChatGPT; перенапруга.

Рис.: 5. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Передача рухомого складу з країн Євросоюзу до українських міст призводить до того, що на маршрут виходять трамваї та тролейбуси з істотно різними технічними показниками. Поріг рекуперації для них також виявляється різним, що приводить до виникнення аварійних ситуацій з вагонами, для яких ця характеристика є нижчою. Через те, що рухомий склад належить до вторинного ринку, на нього не поширюються гарантійні зобов'язання та сервісне обслуговування. А запасні частини, які виходять з ладу при такій експлуатації, вже не можливо замовити. Виникає потреба обмеження максимальної напруги на прийнятному для всіх типів вагонів рівні. Це можливо зробити за допомогою інвертора на тяговій підстанції. Проте досі в Україні міський електротранспорт не має повноважень від вищих закладів на віддачу енергії до мережі середньої напруги. Навпаки, така віддача поки що підпадає під штрафні санкції. Прийнятним у такому випадку стає розміщення на тяговій підстанції резистивного обмежувача напруги.

Постановка проблеми. При встановленні резистивного обмежувача напруги спеціалістами ТОВ «Плутон ІС» було вирішено задачу розсіювання зайвої енергії у вигляді тепла. Однак навіть у такій формі використання енергії гальмування є місце засобам енергоефективності, яку й розглянуто у цій роботі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання рекуперативного гальмування в міському електротранспорті неодноразово підіймалося в літературі [1; 2]. Проте через досить великий опір контактної мережі ефективність перетікання енергії гальмування від рухомого складу до підстанції невелика [3]. До того ж у багатьох країнах, у тому числі й в Україні, є пряма заборона на віддачу енергії від підстанції до мережі середньої напруги [4]. Альтернативою інвертуванню енергії в мережу могло б стати використання накопичувачів на підстанції – суперконденсаторів або акумуляторів, які заряджаються при рекуперативному гальмуванні й розряджаються при споживанні на тягу [5; 6]. Однак на заваді стає величезна вартість таких систем, що перешкоджає отриманню економічного ефекту. Встановлення накопичувачів на рухомому складі [7; 8] призводить до зайвого навантаження останнього. Знаходження на лінії рухомого складу з різними показниками як стосовно рекуперації, так і за граничними технічними параметрами вимагає простого та ефективного рішення з коротким часом впровадження. Таким рішенням може стати розсіювання зайвої енергії в блоках резисторів, встановлених на підстанції. Але, на відміну

від гальмівних резисторів, які розташовано на рухомому складі, стаціонарні резистори працюють зі змінною довжиною контактної мережі, тобто потрібна стабілізація напруги на них з урахуванням падіння напруги на лінії.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз публікацій довів, що в сьогоденні бракує інформації щодо роботи стаціонарних резисторів на підстанції для розсіювання зайвої енергії гальмування.

Метою статті є побудова структурної схеми обмежувача напруги зі стаціонарними резисторами на тяговій підстанції міського електротранспорту для ефективного обмеження перенапруг у контактній мережі та запровадження енергоефективного рішення щодо використання енергії гальмування.

Виклад основного матеріалу. Багатьом містам Східної Європи в межах допомоги з Євросоюзу передають рухомий склад, який до того вже працював на європейських лініях [9-11]. Трамваї мають різні характеристики: поріг початку рекуперативного гальмування, поріг увімкнення гальмівних резисторів, максимальну робочу напругу електротехнічного обладнання. У разі, якщо тягова підстанція обладнана інвертором (рис. 1) проблема сумісності різних типів рухомого складу вирішується зниженням уставки інвертування на найнижчий рівень. Однак в умовах сучасної бази нормативів в Україні, Румунії та Польщі немає можливості віддати енергію в мережу середньої напруги через те, що ця подія прирівнюється до непогодженої генерації. Погодити генерацію неможливо [4] через вимогу відповідних установ надати інформацію щодо об'ємів енергії, що генерується, що в умовах різної пасажиронаповненості та неусталеного графіка руху не є можливим.

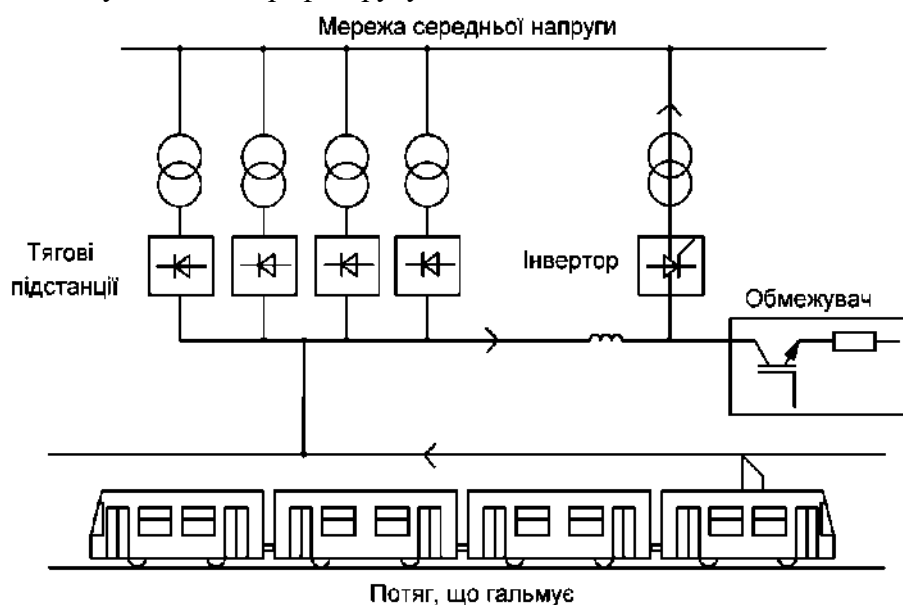


Рис. 1. Організація утилізації енергії гальмування на тяговій підстанції
Джерело: розроблено автором.

У разі, коли в мережі можливі тривалі перенапруги в разі рекуперації рухомих електроенергії за відсутності споживання з мережі (особливо при русі з гори), може знадобитися установка спеціальних пристроїв. На рис. 1 продемонстровано підхід, запропонований автором у ТОВ «Плутон ІС» для вирішення цієї проблеми в міському електротранспорті в місті Орадя (Румунія) та Дніпро (Україна). Замість інвертора на тяговій підстанції встановлюється транзисторний обмежувач напруги – IGBT-чоппер (рис. 2) з блоком резисторів (зворотний діод не показано). У разі коли поїзд, що гальмує, рекуперує енергію, напруга на збірних шинах підвищується. При підвищенні напруги на збірних

шинах вище порогового рівня відкривається транзистор і розсіює енергію гальмування на резисторі. Таке рішення є енергетично невигідним, але при відсутності споживачів енергії або забороні рекуперації в мережу середньої напруги допомагає захистити обладнання. Тобто передусім рішення виконує захисні функції.



Рис. 2. Транзисторний чоппер на випробуваннях у випробувальній лабораторії ТОВ «Плутон ІС»

Джерело: розроблено автором.

Транзисторний ключ може працювати у двох режимах: старт-стопному та стабілізуючому.

Старт-стопний режим є базовим. Коли немає вхідних даних щодо величини спрацювання гальмівних резисторів на рухомому складі, які дозволили б оцінити рівень напруги стабілізації, транзистор вмикається при перевищенні заданого порога та вимикається із затримкою часу після зникнення перенапруг. Таке рішення було використано в м. Орадя, Румунія. На рис. 3 наведено осцилограму роботи обмежувача напруги.

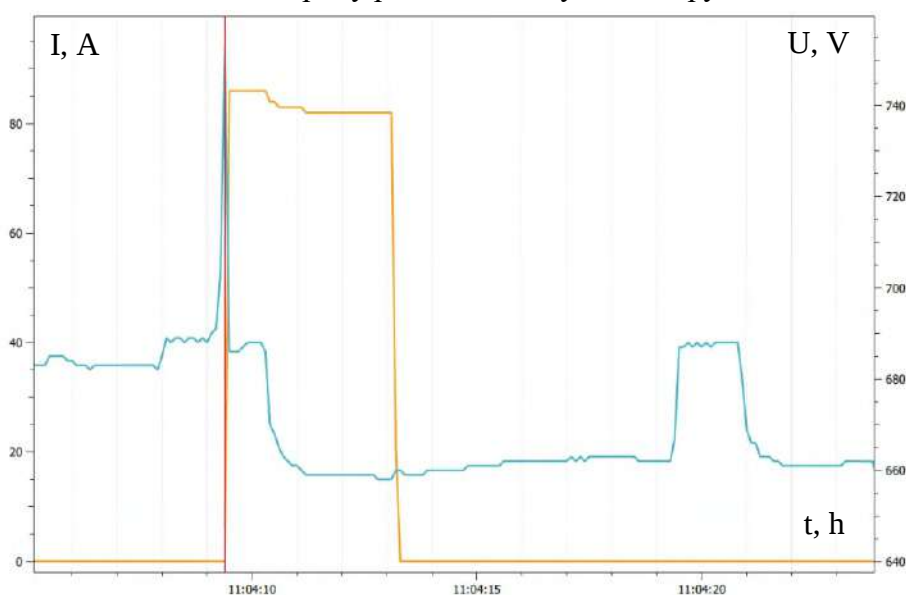


Рис. 3. Осцилограма роботи обмежувача напруги

Джерело: розроблено автором.

Можна бачити, як у момент часу 11.04.09 виникає перенапруга (червоний маркер), спрацьовує обмежувач, скидаючи зайву енергію, напруга зменшується. На осцилограмі жовта крива – струм гасіння, синя – напруга.

Якщо відомі значення по спрацьовуванню гальмівних резисторів на рухомому складі, то можливо організувати стабілізуючий режим роботи обмежувача. Блок резисторів обирається з відомого максимального струму гальмування рухомого складу.

При обговоренні проекту обмежувача напруги для застосування в одному з польських міст (поточний контракт) замовником було висунуто вимогу про утилізацію теплової енергії. Після розрахунків було запроваджено використання теплового акумулятора з гальковим наповненням за аналогією тим, що раніше було розроблено для відновлювальної енергетики [12]. Гальмівні резистори було замінено на теплові електронагрівачі (ТЕНи), які обдуваються примусово повітрям за допомогою вентилятора. Нагріте повітря пропускається через теплоізольовану ємність, яку заповнено галькою (рис. 4). Крізь гальку проходять труби теплообмінника, по яким циркулює вода. Вода відбирає тепло від нагрітої гальки. Нагріта вода використовується для опалення складського приміщення. Тепловий баланс регулюється протоком води. Таким чином, теплоаккумулятор виконує функцію буфера в умовах, коли рекуперація має нерегулярний характер, а її потужність – різною за величиною.

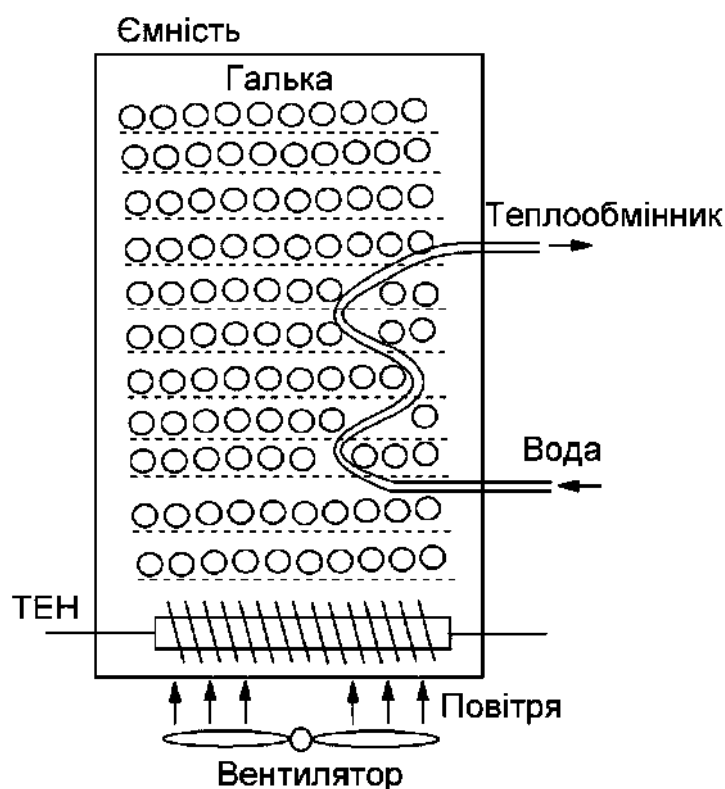


Рис. 4. Принципова схема теплоаккумулятора для утилізації теплової енергії
Джерело: розроблено автором.

На етапі погодження технічного завдання на розробку системи потрібне було якісне оцінювання можливостей такої системи. Для економії часу та для інженерного експерименту було вирішено віддати це завдання на опрацювання ChatGPT. Скріншоти опрацювання запиту наведено на рис. 5.

Значення середньої потужності в 12 кВт було отримано за умовами тягового розрахунку і підтверджено вимірювачами на збірних шинах тягової підстанції.

Таким чином, замовник отримав потенціал використання енергії гальмування для опалення складського приміщення, а дисипативний спосіб боротьби з перенапругами – ефективне використання енергії. Експеримент по долученню до інженерної роботи методів штучного інтелекту було визнано вдалим, і розробку теплового акумулятора було запущено вже з використанням SOLIDWORKS Flow Simulation, у якому проводитиметься детальне моделювання розподілу температур в ємності, уточнюватиметься вага гальки, об'єм ємності, теплоізоляція тощо. Конструкторське опрацювання теплового акумулятора ще триває. Результат його розробки та впровадження на об'єкті виходить за рамки цієї статті.

Допоможі розрахувати тепловий акумулятор. Вхідні дані. Середня потужність тепла 12 кВт. Накопичувач – галька. Гранична температура гальки 500 градусів за Цельсієм. Температура довкілля 40 градусів Цельсія. Ємність для гальки нержавіюча сталь завтовшки 2 мм у формі циліндра. Утеплення мінеральна вата завтовшки 50мм. Який об'єм гальки? Які габарити циліндра? Яка потужність втрат у такому накопичувачі? Яка корисна потужність? Яка протока води потрібна для відведення корисної потужності? Яку площу складського приміщення можливо опалювати таким протоком?

Розрахунок теплового акумулятора на гальці – це комплексна задача, що потребує врахування багатьох факторів. Ось поетапний розрахунок, який допоможе вам визначити основні параметри:

1. Визначення необхідної кількості енергії для накопичення:

Перш за все, потрібно визначити, скільки енергії потрібно накопичувати. Це залежить від того, як довго ви плануєте використовувати накопичену енергію без додаткового нагріву. Наприклад, якщо ви хочете, щоб акумулятор міг віддавати тепло протягом 4 годин без додаткового нагріву, то необхідна кількість енергії становить:

$$\text{Енергія} = \text{Потужність} \times \text{Час} = 12 \text{ кВт} \times 4 \text{ год} = 48 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

2. Розрахунок необхідного об'єму гальки:

- **Теплоємність гальки (с):** Теплоємність гальки залежить від її типу (граніт, кремій тощо), але в середньому можна прийняти $c = 0,84 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.
- **Щільність гальки (ρ):** Щільність також залежить від типу гальки, але в середньому можна прийняти $\rho = 1500 \text{ кг}/\text{м}^3$.
- **Різниця температур (ΔT):** $\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{amb}} = 500^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C} = 460^\circ\text{C}$.
- **Необхідна маса гальки (m):** $E = m \times c \times \Delta T$. Переведемо енергію в кДж: $48 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 48000 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 48000 \times 3600 \text{ Дж} = 172800000 \text{ Дж} = 172800 \text{ кДж}$.
 $m = \text{Енергія} / (c \times \Delta T) = 172800 \text{ кДж} / (0,84 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) \times 460^\circ\text{C}) \approx 447,37 \text{ кг}$
- **Необхідний об'єм гальки (V):** $V = m / \rho = 447,37 \text{ кг} / 1500 \text{ кг}/\text{м}^3 \approx 0,298 \text{ м}^3$. Округлимо до $0,3 \text{ м}^3$.

3. Розрахунок габаритів циліндра:

Тепер потрібно визначити розміри циліндра, який міститиме гальку. Найбільш економічним варіантом є циліндр, висота якого дорівнює діаметру ($h = d$). Тоді:

$$V = \pi \times (d/2)^2 \times h = \pi \times (d/2)^2 \times d = \pi \times d^3 / 4$$

$$d = \sqrt[3]{(4V/\pi)} = \sqrt[3]{(4 \times 0,3 \text{ м}^3 / \pi)} \approx 0,72 \text{ м}$$

$$h = d = 0,72 \text{ м}$$

Таким чином, габарити циліндра: діаметр = 0,72 м, висота = 0,72 м.

4. Оцінка теплових втрат:

Теплові втрати через ізоляцію можна оцінити, використовуючи тепловий опір ізоляції.

- **Теплопровідність мінеральної вати (λ):** $\lambda = 0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$
- **Товщина ізоляції (δ):** $\delta = 50 \text{ мм} = 0,05 \text{ м}$
- **Площа поверхні циліндра (A):** $A = 2\pi r^2 + 2\pi rh = 2\pi (d/2)^2 + 2\pi (d/2)h = 2\pi (0,36 \text{ м}^2) + 2\pi (0,36 \text{ м})(0,72 \text{ м}) = 3,26 \text{ м}^2$
- **Тепловий опір ізоляції (R):** $R = \delta / (\lambda \times A) = 0,05 \text{ м} / (0,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C}) \times 3,26 \text{ м}^2) \approx 0,38^\circ\text{C}/\text{Вт}$
- **Температурний градієнт (ΔT):** $\Delta T = T_{\text{avg}} - T_{\text{env}} = (500^\circ\text{C} + 40^\circ\text{C})/2 - 40^\circ\text{C} = 270^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C} = 230^\circ\text{C}$
- **Потужність втрат (P_loss):** $P_{\text{loss}} = \Delta T / R = 230^\circ\text{C} / 0,38^\circ\text{C}/\text{Вт} \approx 605 \text{ Вт} \approx 0,605 \text{ кВт}$

5. Корисна потужність:

- **Корисна потужність (P_useful):** В ідеальному випадку, корисна потужність = середня потужність тепла (12 кВт). Але, з урахуванням теплових втрат, реальна корисна потужність може бути дещо меншою, особливо якщо накопичувач тривалий час не поповнюється теплом. Якщо потрібно підтримувати постійну корисну потужність 12 кВт, то теплові втрати повинні компенсуватися постійним підгрівом гальки.
- Якщо ми говоримо про віддачу накопиченого тепла, то корисна потужність в даний момент часу буде зменшуватися через охолодження гальки. У цьому випадку середню корисну потужність можна оцінити як: $P_{\text{useful}} = P_{\text{total}} - P_{\text{loss}} = 12 \text{ кВт} - 0,605 \text{ кВт} = 11,395 \text{ кВт}$. Це приблизна оцінка, оскільки втрати будуть змінюватися в залежності від температури гальки.

6. Розрахунок потоку води для відведення корисної потужності:

Для відведення корисної потужності необхідна система теплообміну (наприклад, змійовик з водою всередині гальки).

- **Теплоємність води (c_water):** $c_{\text{water}} = 4,186 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$
- **Різниця температур води (ΔT_water):** Припустимо, що вода на вході має 20°C , а на виході – 60°C . Тоді $\Delta T_{\text{water}} = 60^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 40^\circ\text{C}$.
- **Необхідний масовий потік води (m):** $P_{\text{useful}} = \dot{m} \times c_{\text{water}} \times \Delta T_{\text{water}}$
 $\dot{m} = P_{\text{useful}} / (c_{\text{water}} \times \Delta T_{\text{water}}) = 11,395 \text{ кВт} / (4,186 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) \times 40^\circ\text{C}) = 11395 \text{ Вт} / (167,44 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})) \approx 68,05 \text{ кг}/\text{с}$
- **Необхідний об'ємний потік води (Q):** $Q = \dot{m} / \rho_{\text{water}}$ (де ρ_{water} – щільність води $\approx 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$)
 $Q = 0,068 \text{ кг}/\text{с} / 1000 \text{ кг}/\text{м}^3 = 0,000068 \text{ м}^3/\text{с} = 0,068 \text{ л}/\text{с} \approx 4,08 \text{ л}/\text{хв}$

Підсумок:

- **Об'єм гальки:** $\approx 0,3 \text{ м}^3$
- **Габарити циліндра:** діаметр = 0,72 м, висота = 0,72 м
- **Потужність втрат:** $\approx 0,605 \text{ кВт}$ (за умов середньої температури гальки 270°C)
- **Корисна потужність:** $\approx 11,395 \text{ кВт}$ (за умов відсутності додаткового нагріву та поступового охолодження гальки) або 12 кВт (за умов компенсації втрат постійним підгрівом)
- **Протока води:** $\approx 4,08 \text{ л}/\text{хв}$ (для нагріву води на 40°C)
- **Опалювальна площа:** $\approx 227,9 \text{ м}^2$ (для добре утепленого приміщення)

Площа, яку можна опалювати, силь

но залежить від теплоізоляції приміщення, кліматичної зони та необхідної температури в приміщенні. Зробити точну оцінку без цих даних неможливо. Проте, для приблизної оцінки можна використати такі міркування:

- **Типові потреби в опаленні:** Для добре утепленого будинку потрібно близько $50 \text{ Вт}/\text{м}^2$ для опалення в помірному кліматі.
- **Опалювальна площа (A_heating):** $A_{\text{heating}} = P_{\text{useful}} / \text{Потреби}_{\text{в опаленні}} = 11395 \text{ Вт} / 50 \text{ Вт}/\text{м}^2 \approx 227,9 \text{ м}^2$

Таким чином, теоретично, ви могли б опалювати близько $227,9 \text{ м}^2$ добре утепленого приміщення в помірному кліматі.

Рис. 5 Опрацювання запиту ChatGPT

Джерело: розроблено автором з використанням @gpt3_unlim_chatbot.

Після оприлюднення результатів впровадження таких систем ТОВ «Плутон ІС» [13; 14], аналогічні пропозиції з'явилися у фірми АВВ [15] для метрополітену. АВВ наголошують на електричному відведенні енергії гальмування за межі тунелів метро. Тобто перешкоджаючи включенню штатних гальмівних резисторів на потязі, енергію гальмування розсіюють за межами тунелю та підстанції, що добре позначається на ефективності вентиляційних систем метрополітена.

Висновки. У статті проведено побудову структурної схеми обмежувача напруги зі стаціонарними резисторами на тяговій підстанції міського електротранспорту для ефективного обмеження перенапруг у контактній мережі. На перший погляд неефективне рі-

шення має потенціал щодо збільшення енергоефективності в загальній економії при використанні енергії гальмування для опалення приміщення або економії на системах вентиляції в метрополітені. Експеримент з долучення інструментів штучного інтелекту при формуванні технічного замовлення було визнано вдалим.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів.

Під час написання цього матеріалу автор(и) використовували телеграм-бот @gpt3_unlim_chatbot - для демонстрації можливостей штучного інтелекту в науковій та інженерній практиці.

Після використання цього інструменту/сервісу автор переглянув та відредагував зміст за потреби і взяв на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Тарнижевский, М., & Томлянович, Д. (1986). *Проектирование устройств электроснабжения трамвая и троллейбуса*. Транспорт.
2. Drozdowski, Piotr & Duda, Arkadiusz. (2016). Modernised DC traction substation recuperating energy of braking. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161000017>.
3. Cascetta, F., Cipolletta, G., Delle Femine, A., Quintana Fernández, J., Gallo, D., Giordano, D., & Signorino, D. (2021). Impact of a reversible substation on energy recovery experienced on-board a train. *Measurement*, 183, 109793. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109793>.
4. Про затвердження Кодексу систем розподілу, Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг № 310 (2025) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text>
5. Fletcher, D. I., Harrison, R. F., & Nallaperuma, S. (2020). TransEnergy – a tool for energy storage optimization, peak power and energy consumption reduction in DC electric railway systems. *Journal of Energy Storage*, 30, 101425. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101425>.
6. Wiecek, Maciej & Lewandowski, Mirosław. (2018). Energy storage system in traction vehicle. *MATEC Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818002008>.
7. Ebadi, R., Sadeghi Yazdankhah, A., Mohammadi-Ivatloo, B., & Kazemzadeh, R. (2020). Coordinated power and train transportation system with transportable battery-based energy storage and demand response: A multi-objective stochastic approach. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123923. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123923>.
8. Al-Ezee, H. M., Tennakoon, S., Taylor, I., Schedeicker, D., & Schweickart, J. (2017). An on-board energy storage system for catenary free operation of a tram. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(15), 540–544. <https://doi.org/10.24084/repqj15.386>.
9. *Tramvaiul din oradea se modernizează cu vagoane aduse din berlin și cu tramvaie noi achiziționate cu fonduri europene - mobilitate.eu*. (n.d.). Mobilitate.eu. <https://mobilitate.eu/tramvaiul-oradea-vagoane-modernizate>.
10. *У Запоріжжі на лінію вийшли ще 2 європейських трамваї - Офіційний сайт Запорізької міської ради*. (б. д.). Запорізька міська рада - офіційний веб-сайт. <https://zp.gov.ua/uk/articles/item/3883/u-zaporizhzhii-na-liniyu-vijshli-sche-2-evropejskih-tramvai>.
11. *У Дніпрі на маршрути випустили 5 вживаних трамваїв з Німеччини*. (б. д.). Інформатор Дніпро. <https://dp.informator.ua/uk/u-dnipro-na-marshruti-vipustili-5-vzhivanih-tramvajiv-z-nimechchini>.
12. Okazaki, T., Shirai, Y., & Nakamura, T. (2015). Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage. *Renewable Energy*, 83, 332–338. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.027>.
13. *Проектування, розробка та постачання двоагрегатної модульної тягової підстанції cicero для трамвайної лінії м. орадея*. (б. д.). Головна. <https://pluton.ua/news/design-development-and-supply-of-two-unit-modular-traction-substation-cicero-for-oradea-tram-line>.
14. Стрункін, Г.М. (2025). Застосування пристроїв силової електроніки ISBN 978-617-8139-59-9. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15256472>.

15. ENVILINE™ EDS Energy Dissipation System for DC rail transportation. (n.d.). https://library.e.abb.com/public/ef17a1a91819f976c1257e0c0047951d/ENVILINE_EDS_4116PL857-W1-en_052013.pdf.

References

1. Тарнижевский, М., & Томлянович, Д. (1986). *Проектирование устройств электроснабжения трамвая и троллейбуса*. Транспорт.
2. Drozdowski, Piotr & Duda, Arkadiusz. (2016). Modernised DC traction substation recuperating energy of braking. *E3S Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20161000017>.
3. Cascetta, F., Cipolletta, G., Delle Femine, A., Quintana Fernández, J., Gallo, D., Giordano, D., & Signorino, D. (2021). Impact of a reversible substation on energy recovery experienced on-board a train. *Measurement*, 183, 109793. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109793>.
4. Pro zatverdzhennia Kodeksu system rozpodilu, Postanova Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh [On Approval of the Code of Distribution Systems, Resolution of the National Energy and Utilities Regulatory Commission No. 310 (2025) (Ukraine)].
5. Fletcher, D. I., Harrison, R. F., & Nallaperuma, S. (2020). TransEnergy – a tool for energy storage optimization, peak power and energy consumption reduction in DC electric railway systems. *Journal of Energy Storage*, 30, 101425. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101425>.
6. Wiecek, Maciej & Lewandowski, Mirosław. (2018). Energy storage system in traction vehicle. *MATEC Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818002008>.
7. Ebadi, R., Sadeghi Yazdankhah, A., Mohammadi-Ivatloo, B., & Kazemzadeh, R. (2020). Coordinated power and train transportation system with transportable battery-based energy storage and demand response: A multi-objective stochastic approach. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123923. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123923>.
8. Al-Ezee, H. M., Tennakoon, S., Taylor, I., Schedecker, D., & Schweickart, J. (2017). An on-board energy storage system for catenary free operation of a tram. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(15), 540–544. <https://doi.org/10.24084/repqj15.386>.
9. Tramvaiul din oradea se modernizează cu vagoane aduse din berlin și cu tramvaie noi achiziționate cu fonduri europene - mobilitate.eu. (n.d.). Mobilitate.eu. <https://mobilitate.eu/tramvaiul-oradea-vagoane-modernizate>.
10. . U Zaporizhzhii na liniuu vyshly shche 2 yevropeiskyykh tramvai [Two more European trams go on line in Zaporizhzhia]. (n.d.). *Ofitsiyni sait Zaporizkoi miskoi rady* – Official website of Zaporizhzhia City Council. <https://zp.gov.ua/uk/articles/item/3883/u-zaporizhzhii-na-liniyu-vijshli-sche-2-evropejskikh-tramvai>.
11. U Dnipri na marshruty vypustyly 5 vzhivanykh tramvaiv z Nimechchyny [In Dnipro, 5 second-hand trams from Germany were put on the road. *Informator Dnipro – Informator Dnipro*. <https://dp.informator.ua/uk/u-dnipro-na-marshruti-vipustili-5-vzhivanih-tramvajiv-z-nimechchini>.
12. Okazaki, T., Shirai, Y., & Nakamura, T. (2015). Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage. *Renewable Energy*, 83, 332–338. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.027>.
13. Proiektuvannia, rozrobka ta postachannia dvoahrehatnoi modulnoi tiahovoi pidstantsii cicero dlia tramvainoi linii m. Oradia [Design, development and delivery of a two-unit modular traction substation cicero for the tram line in Orcadia]. (n.d.). Holovna.
14. Strunkin, H.M. (2025). *Zastosuvannia prystroiv sylovoi elektroniky* ISBN 978-617-8139-59-9. Zenodo [Applications of power electronics devices ISBN 978-617-8139]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15256472>.
15. ENVILINE™ EDS Energy Dissipation System for DC rail transportation. https://library.e.abb.com/public/ef17a1a91819f976c1257e0c0047951d/ENVILINE_EDS_4116PL857-W1-en_052013.pdf.

Отримано 15.03.2025

Hlib Strunkin

senior researcher of the research laboratory "Industrial Electronics",
Engineering Institute of Zaporizhzhia National University engineer "PlutonIC" LLC.

e-mail: strunkingleb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>. ResearcherID: [LNQ-2155-2024](#)

**VOLTAGE LIMITER FOR URBAN ELECTRIC TRANSPORT TRACTION
SUBSTATIONS**

The article provides information on the current state of the rolling stock of urban electric transport in Eastern Europe. It is shown that, due to available rolling stock with significantly different technical parameters in operation, it is possible for cars with the lowest maximum values of operational parameters to fail due to overvoltages due to braking. Due to the ban by Ukrainian legislation on generation of electricity into the medium-voltage network without coordination of its volumes and due to high cost of accumulators, the only possibility of combating overvoltage remains the dissipative method. With this method, excess braking energy is dissipated on stationary resistors located at the traction substation. Operation of a transistor voltage limiter, which was used in the Oradea and Dnipro urban electric transport, is presented. Oscillograms of its operation are given. The transistor limiter is a chopper that can operate both in the start-stop mode and in the voltage stabilization mode. Using artificial intelligence methods, the assessment of the use of braking energy for heating the premises to increase the energy efficiency of the system was obtained. In this case, irregular braking power is transferred to the energy carrier of the warehouse heating system using the thermal accumulator. The experience of using artificial intelligence tools was generally recognized as satisfactory. Leading companies in the production of electrical equipment for traction substations borrowed the idea and proposed using it to facilitate the ventilation mode of subway tunnels by transferring heat generation outside the substation and tunnels. It was proven that even an inefficient solution at first glance can be used to improve the overall energy efficiency of the system as a whole.

Keywords: braking energy, transistor switch, fixed resistor, heat accumulator, ChatGPT, overvoltage.

Fig.: 5. **References:** 15.

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2025-1(39)-315-327

УДК 528.8: 681.518

**Валентин Олександрович Боровий¹, Оксана Володимирівна Браславська²,
Томас Адальбертович Рожі³**

¹доктор технічних наук, професор кафедри географії, геодезії та землеустрою
Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини (Умань, Україна)
E-mail: v.o.borovy@udpu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0965-6313>

²доктор педагогічних наук, професор кафедри географії, геодезії та землеустрою
Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини (Умань, Україна)
E-mail: oksana.braslavska@udpu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0852-686X>

³викладач кафедри географії, геодезії та землеустрою
Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини (Умань, Україна)
E-mail: tomas.rozhi.94@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6794-9662>

СУПУТНИКОВЕ ТА БПЛА-ЗНІМАННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТИ МОНІТОРИНГУ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ: СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В УКРАЇНІ

У статті проаналізовано інноваційні методи дистанційного зондування земельних ресурсів, зокрема супутникове знімання та БПЛА-знімання, що підвищують ефективність управління завдяки оперативному моніторингу територій, оцінці змін у землекористуванні та екологічних показників. Встановлено, що інтеграція супутникових технологій із БПЛА-зніманням формує комплексний механізм збору та обробки геопросторової інформації, що підвищує точність моніторингу та дозволяє прогнозувати зміни у використанні земель. Проведено порівняльний аналіз переваг та обмежень супутникового й аерофотознімання. Обґрунтовано необхідність використання геоінформаційних систем для автоматизованої обробки масивів даних дистанційного зондування.

Ключові слова: дистанційне зондування; супутникове знімання; безпілотні літальні апарати; геоінформаційні системи; моніторинг земельних ресурсів; землекористування.

Рис.: 6. Табл.: 1. Бібл.: 23.

Актуальність теми дослідження. В умовах постійного зростання рівня використання земельних ресурсів, що супроводжується необхідністю підвищення ефективності їхнього управління, дедалі більшого значення набувають сучасні методи дистанційного зондування, серед яких особливо варто виділити технології супутникового моніторингу та знімання за допомогою безпілотних літальних апаратів. Використання цих інноваційних інструментів дозволяє не лише здійснювати регулярний контроль за станом земельних угідь, а й відстежувати динаміку змін у структурі землекористування, оперативно ідентифікувати можливі екологічні загрози та прогнозувати потенційні ризики, що можуть негативно впливати на довкілля та ефективність використання земельних ресурсів. В умовах України актуальність застосування супутникового моніторингу та БПЛА-знімання (безпілотних літальних апаратів) зумовлена низкою ключових факторів, серед яких особливе місце посідає необхідність удосконалення механізмів раціонального землекористування, запровадження передових цифрових технологій у систему кадастрового обліку, забезпечення ефективного контролю за станом сільськогосподарських угідь, а також виявлення та запобігання незаконним діям, пов'язаним із самовільним захопленням чи неправомірним використанням земельних ділянок та території України.

Постановка проблеми. Провідні технології супутникового та безпілотного аерознімання характеризуються високою роздільною здатністю та точністю отриманих зображень, що дозволяє здійснювати детальний аналіз змін, які відбуваються в межах певної території, та оперативно реагувати на нові виклики, зокрема пов'язані з процесами змін клімату, поступовою деградацією родючих ґрунтів, посиленням урбанізаційного навантаження та іншими чинниками, що впливають на стан земельного фонду. Інтеграція цих

методів у загальну систему моніторингу земельних ресурсів не лише сприяє підвищенню ефективності ухвалення управлінських рішень, а й дозволить надалі мінімізувати корупційні ризики у сфері землеустрою, створюючи передумови для побудови прозорої та відкритої системи контролю за використанням земель, що відповідатиме сучасним вимогам цифровізації та автоматизації управлінських процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження авторства Є. Дружинін, М. Ковалевський, О. Погудіна, В. Черановський [1]; М. М. Куамар, Б. Аль-Рамадан, К. Хан, М. Шафіулла та С. Ель Ферік [2], об'єднують у собі методи дистанційного зондування земельних ресурсів, супутникового моніторингу та застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для аналізу стану землекористування, отримали значний імпульс до розвитку у науковій літературі, де особливу увагу приділяються не тільки технологічним аспектам, але й можливостям їх практичного застосування. Водночас К. Нгуєн, М. Данг, Л. Буй, К. Буй [3] та Р. Ван Альфен, К. Рейнс, М. Роджерс, Р. Малсервісі і Т. Діксон [4], фокусують свою увагу на критичній ролі супутникових знімків, які стають незамінним інструментом для оцінювання екологічних змін, виявлення процесів деградації природного середовища та систематизації динаміки розвитку земельних ресурсів, хоча існуючі системи, такі як Landsat, Sentinel та MODIS, необхідно доповнювати, оскільки вони мають певні обмеження, пов'язані, наприклад, з впливом погодних умов та регулярністю отримання нових даних.

У науковому контексті особливо актуальною стала проблема поєднання супутникового моніторингу з БПЛА, що забезпечує не лише високу просторову роздільну здатність, але й оперативність збору інформації, що надзвичайно важлива для детального аналізу локальних особливостей земельного покриву, контролю за станом сільськогосподарських угідь та ідентифікації конкретних проблемних зон, таких як засоленість, недостатня волога чи ерозійні процеси, через що БПЛА-технології дедалі частіше пропонуються як ефективне доповнення супутникових даних для отримання комплексної картини землекористування (Ч. Лю, Х. Лі, Ю. Сюе, В. Лу та Ч. Чжан [5]).

Крім того, велика частина наукових досліджень від Т. Ямелинець [6] та О. Згурська, О. Корчинська, К. Рубель, С. Кубів, А. Тарасюк, О. Головченко [7], концентрується на інтеграції геоінформаційних систем (ГІС) у процес обробки супутникових та БПЛА-даних, що дозволяє автоматизувати процедури аналізу, значно підвищуючи точність оцінки землекористування, особливо у разі використання вегетаційних індексів, таких як NDVI, який визначено як ефективний для оцінювання стану рослинного покриву, продуктивності аграрних теренів та виявлення змін у природних екосистемах, що робить цей підхід особливо перспективним для широкого кола застосувань. Попри досягнуті успіхи, у науковій літературі залишається багато нерозв'язаних питань, зокрема потреба в розробці універсальних алгоритмів для інтеграції супутникових у єдину інформаційну систему, підвищення точності спектрального аналізу, а також адаптації технологій зондування до специфічних потреб у сфері землекористування.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри суттєвий прогрес у використанні супутникового та БПЛА-знімання для моніторингу земельних ресурсів, залишаються невирішеними низка наукових та технічних аспектів, які потребують глибшого дослідження та системного вдосконалення, зокрема недостатня розробленість механізмів інтеграції масивів даних дистанційного зондування, які могли б забезпечити автоматизований аналіз динаміки землекористування, прогнозування антропогенних і природних змін, а також формування стратегій адаптації до них через відсутність уніфікованих алгоритмів обробки та інтерпретації різнорідних даних. Крім того, актуальним завданням є подолання обмежень у сфері аналізу багатоспектральних зображень, де недорозвиненість алгоритмів ідентифікації дрібномасштабних змін у структурі земельного покриву, таких як мікродеградація ґрунтів, фрагментація екосистем або локальні зміни вологості, ускладнює прогнозування масштабних деградаційних процесів.

Метою статті є дослідження використання сучасних методів дистанційного зондування, таких як супутникове та БПЛА-знімання, для ведення системного моніторингу стану земельних ресурсів України, оцінювання змін у їх використанні, виявленні екологічних загроз та створенні інтегрованих підходів до обробки цифрових даних.

Виклад основного матеріалу. Сучасні технології дистанційного зондування, зокрема супутникове знімання та використання БПЛА, відкривають значні перспективи для фахівців, що працюють у сфері кадастрового обліку, землеустрою та моніторингу земельних ресурсів. Якщо раніше процес аерофотознімання вимагав залучення авіаційної техніки, такої як літаки та вертольоти, що супроводжувалося значними фінансовими витратами та потребувало значного часу для реалізації, то на сьогодні аналогічні завдання можна ефективно виконати за допомогою БПЛА, що суттєво скорочує часові витрати, оптимізує витрати ресурсів та підвищує ефективність знімання території. Застосування сучасних методів управління природокористуванням, які базуються на дешифруванні аерофотоматеріалів, дозволяє суттєво полегшити та пришвидшити процес аналізу стану земельних ділянок без втрати точності отриманих даних. Завдяки використанню БПЛА у процесі моніторингу земельних ресурсів можна вирішувати широкий спектр завдань, серед яких особливу важливість мають такі аспекти, як збір детальної інформації про стан об'єктів нерухомості з метою визначення відповідності їхніх характеристик встановленим екологічним, технологічним та нормативним вимогам, а також здійснення аналізу природного середовища [8]. Крім того, значне значення має використання дронів для картографування окремих елементів земної поверхні, що дозволяє створювати актуальні основи для територіального планування, землеустрою та просторового аналізу земельних ділянок.

Однією з ключових переваг технологій супутникового моніторингу є можливість здійснення систематичного контролю за станом сільськогосподарських угідь, що включає оцінку рівня їх цільового використання, моніторинг деградаційних процесів, оперативний аналіз стану ґрунтів, а також прогнозування рівня врожайності. Крім того, застосування БПЛА у сфері земельного моніторингу дозволяє здійснювати контроль за запобіганням незаконному використанню земельних ділянок, що є особливо важливим у контексті боротьби з несанкціонованим втручанням та самовільним захопленням земель. Також безпілотні літальні апарати активно використовуються для оновлення топографічних карт, що дозволяє підвищити рівень деталізації географічних даних, а отримані матеріали можуть бути інтегровані у геоінформаційні системи (ГІС), що забезпечує комплексний підхід до управління земельними ресурсами [9].

Окрім цього, супутникове зондування виступає важливим джерелом інформації для виконання завдань, пов'язаних із просторовим аналізом та моніторингом змін у структурі землекористування. Завдяки високій точності та інформативності супутникових знімків можна не лише оперативно відстежувати тенденції змін у використанні земельних угідь, а й отримувати детальну інформацію про зміни площ забудованих територій, що є особливо актуальним у контексті розвитку сільських населених пунктів. Наприклад, за допомогою аналізу супутникових зображень можна виявляти незаконні процеси самовільного розширення присадибних ділянок за рахунок сільськогосподарських земель, що дозволяє місцевим органам самоврядування оперативно реагувати на подібні порушення, здійснювати контроль за дотриманням норм землекористування та запобігати незаконному використанню земельних ресурсів.

Використання БПЛА у процесі аерофотознімання та аналізу стану ґрунтів набуло широкого розповсюдження завдяки високій точності отримуваних даних, оперативності їхнього збору, економічній доцільності та доступності цієї технології у порівнянні з традиційними методами наземного моніторингу. Сучасні БПЛА обладнані сучасними камерами

з високою роздільною здатністю, мульти- та гіперспектральними сенсорами, лазерними сканерами (лідари), а також системами глобального позиціонування (GPS), що дає змогу проводити детальний аналіз територій із високою точністю та швидкістю [10].

Однією з головних переваг застосування БПЛА є можливість швидкого збору повної інформації про стан земельних угідь без необхідності безпосередньої присутності спеціалістів на досліджуваній території. За короткий проміжок часу дрон може зібрати значний обсяг даних про стан земельної ділянки, створити детальні візуальні зображення, що є критично важливим для оперативного моніторингу та прийняття ефективних управлінських рішень у сфері сільського господарства та землекористування. Завдяки високій продуктивності БПЛА, за один робочий день може обстежити територію площею до 5 тис. га, що робить цей метод значно ефективнішим у порівнянні з традиційними наземними способами обстеження, які потребують значних затрат часу та людських ресурсів (рис. 1).



Рис. 1. Моніторинг стану полів за допомогою БПЛА

Джерело: [11].

Супутникове знімання виступає провідним і популярним методом дистанційного моніторингу стану земельних ресурсів, що базується на використанні зображень, отриманих із супутникових платформ, які здійснюють постійне спостереження за землею поверхнею. Сучасні супутники, що активно застосовуються у сфері аграрного землекористування та моніторингу земель, оснащені передовими сенсорними системами, здатними здійснювати багатоспектральне зондування, включаючи видимий, інфрачервоний та інші діапазони спектра, що забезпечує високу роздільну здатність отриманих зображень і дозволяє проводити детальний аналіз стану земельних угідь.

Завдяки здатності супутникових систем охоплювати значні території та здійснювати регулярне оновлення інформації, вони є незамінним інструментом у процесах глобального моніторингу земельних ресурсів, що дозволяє не лише отримувати ключові характеристики досліджуваних територій, а й виконувати розрахунки різноманітних вегетаційних індексів, необхідних для оцінки стану рослинного покриву та продуктивності аграрних угідь. Одним із найбільш поширених і важливих індексів, що активно використовується в сільськогосподарському секторі, є NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), який дозволяє оцінити рівень розвитку та стан рослинності на основі аналізу спектральних характеристик поверхні [5].

Індекс NDVI визначається як відношення різниці між відбиттям світла у ближньому інфрачервоному діапазоні та відбиттям у червоному діапазоні до їхньої суми, що дає можливість оперативно аналізувати рівень вегетації та ідентифікувати потенційно проблемні ділянки, які можуть потребувати додаткової уваги або коригувальних заходів (рис. 2).

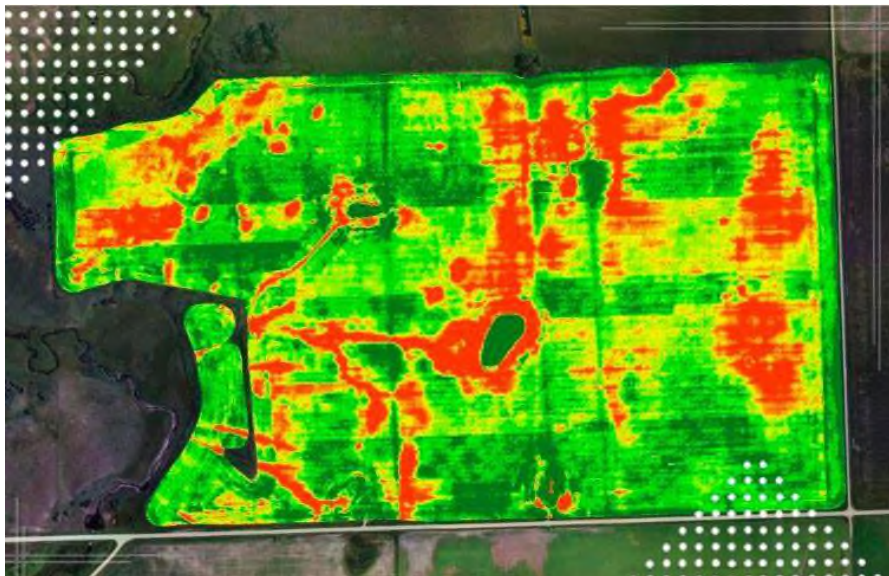


Рис. 2. Супутниковий знімок поля у ближньому ІЧ-діапазоні

Джерело: [12].

Супутникове знімання як метод моніторингу земельних ресурсів має низку суттєвих переваг, які роблять його незамінним інструментом для проведення комплексного аналізу стану земельних угідь у масштабах великих територій. Одна з головних переваг цієї технології полягає в тому, що вона дозволяє отримувати зображення, які вже інтегровані у відповідні платформи для обробки геопросторових даних, що значно полегшує подальший аналіз та використання інформації у процесі управління земельними ресурсами. У той час як дані, отримані за допомогою БПЛА, потребують додаткової інтеграції в програмні комплекси для їхньої обробки, супутникові знімки вже надходять у системи аналізу, що скорочує час на обробку інформації та підвищує оперативність прийняття рішень. Попри численні переваги, супутниковий моніторинг має й певні недоліки, серед яких особливо значущою є його залежність від погодних умов. Оскільки більшість оптичних супутників здійснюють знімання у видимому спектрі, наявність щільного хмарного покриву може значно ускладнювати отримання чітких зображень, що створює певні перешкоди для безперервного моніторингу земель. Крім того, супутникові системи мають встановлений графік знімання, що призводить до нерегулярності оновлення даних і може створювати часові затримки у процесі отримання актуальної інформації, особливо в умовах швидких змін, що відбуваються на досліджуваній території [13, с. 51].

Для об'єктивної оцінки ефективності різних методів дистанційного зондування доцільно провести їхнє порівняння за ключовими характеристиками, що дозволить визначити оптимальне поєднання супутникових і БПЛА-технологій для комплексного моніторингу земельних ресурсів. Детальне зіставлення цих методів, з урахуванням їхніх переваг і недоліків, представлено в табл. 1, що дає змогу сформулювати цілісне уявлення про можливості їхнього застосування у сфері землеустрою. Доцільність використання конкретного способу збору даних безпосередньо залежить від низки факторів, зокрема від масштабів дослідження, рівня необхідної деталізації отриманої інформації, періодичності оновлення даних, а також природно-кліматичних умов досліджуваного регіону.

Таблиця 1 – Порівняння технологій для моніторингу земель

Критерій порівняння	БПЛА	Супутник
Дозвіл	нижче, ніж знімання із супутника	висока
Точність знімання	висока	низька
Залежність від хмарності	можливість працювати у хмарну погоду	залежить від погоди
Періодичність знімання	знімки в реальному часі	нерегулярність одержуваних даних
Інтегрування отриманої інформації	інформацію користувач повинен сам інтегрувати в програмні рішення	знімки вже інтегровані в платформу обробки даних у зручному для аналізу форматі
Вартість знімання	дешевше	дорожче

Джерело: сформовано на основі [4; 5; 9].

Саме тому найбільш ефективною стратегією є комбіноване застосування супутникового моніторингу та знімання за допомогою БПЛА, що дозволяє компенсувати недоліки кожного з методів та отримувати найбільш повну картину змін у землекористуванні. На відміну від супутникового зондування, БПЛА дають технічну можливість отримати цифрові дані з надзвичайно високою просторовою роздільною здатністю, що дає змогу виконувати детальний аналіз конкретних ділянок та оперативно реагувати на зміни, що відбуваються у процесі землекористування. Завдяки мобільності та гнучкості в налаштуванні, безпілотні літальні апарати забезпечують можливість збору точних даних у режимі реального часу, що особливо важливо для моніторингу посівів, контролю ерозійних процесів, оцінки стану лісових масивів та виявлення порушень у використанні земельних ресурсів [2].

Знімки, отримані за допомогою супутникових систем дистанційного зондування, зберігаються та обробляються на геопорталі Earth Explorer, що є частиною сервісу USGS. Ця платформа надає можливість здійснювати пошук необхідних даних за широким спектром критеріїв, зокрема встановлювати допустимий рівень хмарності, фільтрувати знімки за конкретними часовими інтервалами, обирати типи знімальних систем або аналізувати зображення, отримані у певний період доби [14].

На борту сучасних супутників, що застосовуються для моніторингу земель, встановлені високотехнологічні прилади, серед яких особливе місце займає багатоканальний скануючий радіометр Operational Land Imager (OLI), що дозволяє отримувати зображення земної поверхні з максимальною просторовою роздільною здатністю до 15 метрів, забезпечуючи точний аналіз стану територій. Крім того, на супутнику встановлений двоканальний інфрачервоний скануючий радіометр Thermal InfraRed Sensor (TIRS), який дає змогу фіксувати теплові характеристики земної поверхні, що є надзвичайно важливим для оцінки вологості ґрунтів, виявлення зон деградації земель та аналізу екологічного стану агроландшафтів.

На основі супутникових та аерофотознімків, отриманих із застосуванням БПЛА, було проведено комплексний аналіз поверхні досліджуваної території з особливим акцентом на мікрорельєфні особливості, які мають суттєве значення для вивчення агроландшафтних структур і просторової організації земельних угідь. Зокрема, матеріали дистанційного зондування дали змогу визначити на території дослідження такі важливі мікроелементи рельєфу, як невеликі западини, мікролощини, водотоки тимчасового характеру, окремі височини та сліди механічної обробки ґрунту сільськогосподарською технікою [15].

Цифрові знімки, що представлені на рис. 3, демонструють результати аерофотознімання, виконаної за допомогою безпілотних літальних апаратів, і відображають детальну картину стану земельної поверхні досліджуваної ділянки, що може бути використана для подальшого аналізу змін у землекористуванні, планування агротехнічних заходів та проведення моніторингу стану земельних ресурсів у режимі реального часу.

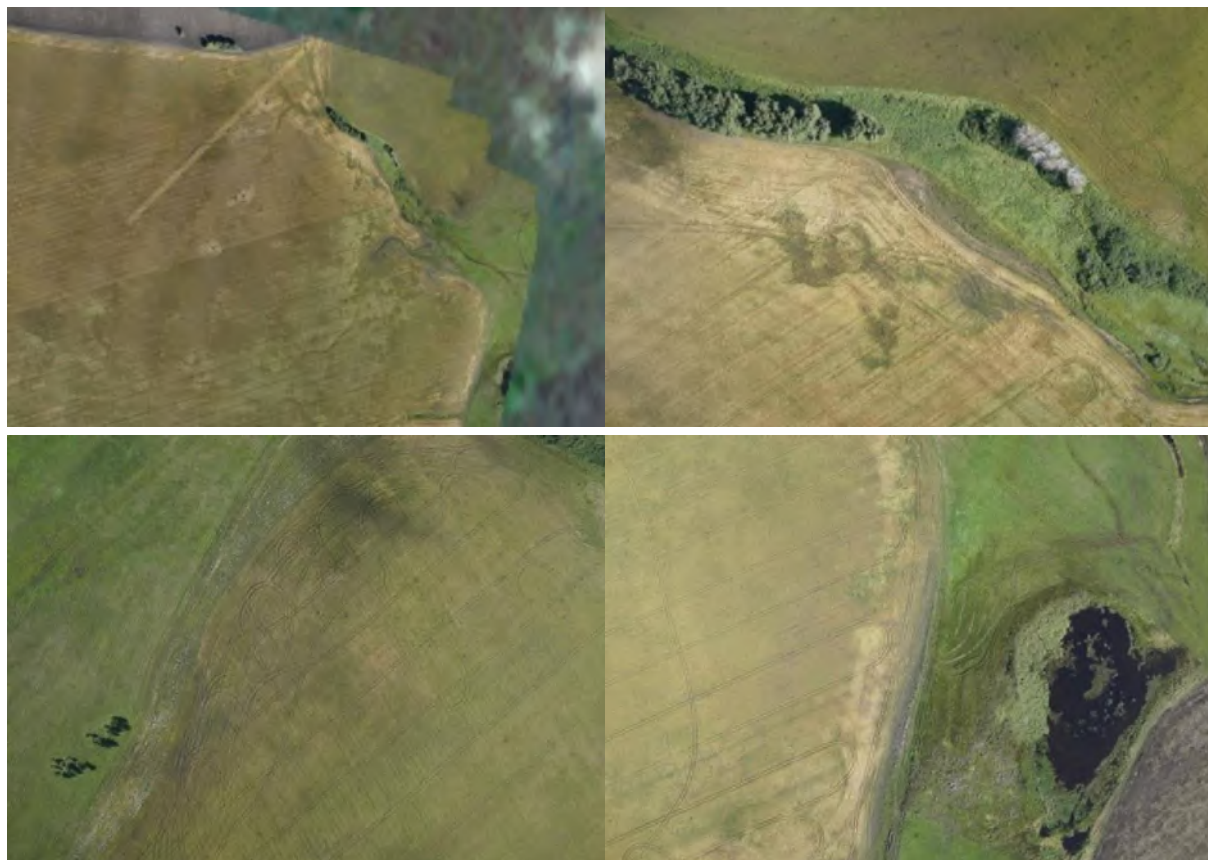


Рис. 3. Серія аерофотознімків моніторингових земельних ділянок, отриманих за допомогою БПЛА

Джерело: [10].

Після виконання аерофотознімання за допомогою супутникових та БПЛА-технологій отримані матеріали підлягали попередній обробці, що включала їх конвертацію у стандартизований обмінний формат, який забезпечує сумісність із (ГІС для подальшого аналізу та обробки просторових даних. На етапі імпорту цифрових аерофотознімків до геоінформаційної системи проводився відбір зображень, при якому низькоякісні знімки виключалися для підвищення точності аналізу та достовірності кінцевих результатів дослідження. Обробка отриманих даних здійснювалася за допомогою програмного комплексу ArcGIS 10.1 (ESRI Inc.), який забезпечує широкий спектр функцій для аналізу та обробки просторової інформації. Додатково використовувалося спеціалізоване програмне забезпечення Agisoft PhotoScan Professional Edition, яке дозволяє створювати високоточні цифрові моделі місцевості на основі аерофотознімків. Завдяки інтеграції цих технологій стало можливим виконання комплексного аналізу отриманих даних, що включав векторизацію (оцифрування) матеріалів аерофотознімання, створення ортофотопланів із необхідним масштабом, генерацію цифрових моделей рельєфу (ЦМР) та побудову спеціалізованих картографічних продуктів [15, с. 74].

Процес моделювання місцевості передбачав створення цифрової моделі поверхні (ЦМП) земельних угідь, тривимірної (3D) моделі рельєфу, карт пластики рельєфу та інших тематичних карт, які дозволяють деталізовано досліджувати особливості земельних ресурсів та їх зміну в часі. У процесі аналізу також здійснювалася векторизація об'єктів місцевості, що включала виділення меж сільськогосподарських угідь та визначення контурів досліджуваних ділянок (рис. 4).

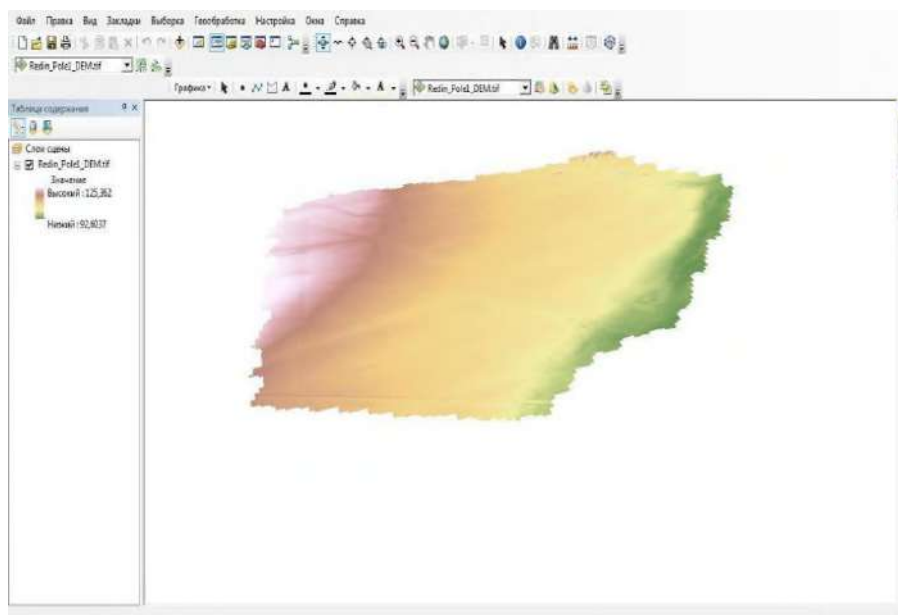


Рис. 4. Зображення опорної ділянки у спектрі висот поверхні
(Agisoft PhotoScan Professional Edition)

Джерело: [16].

Розроблена цифрова карта досліджуваної території в поєднанні зі створеними атрибутивними базами даних є ключовою основою для подальшого проведення детальних досліджень у сфері моніторингу земельних ресурсів, аналізу агроландшафтних характеристик та планування раціонального землекористування. Отримані картографічні матеріали дозволяють створювати спеціалізовані тематичні карти, що забезпечують комплексний просторовий аналіз досліджуваної місцевості, відображають особливості ґрунтового покриття, структуру рослинності, гідрографічні особливості та рельєфні параметри (рис. 5).

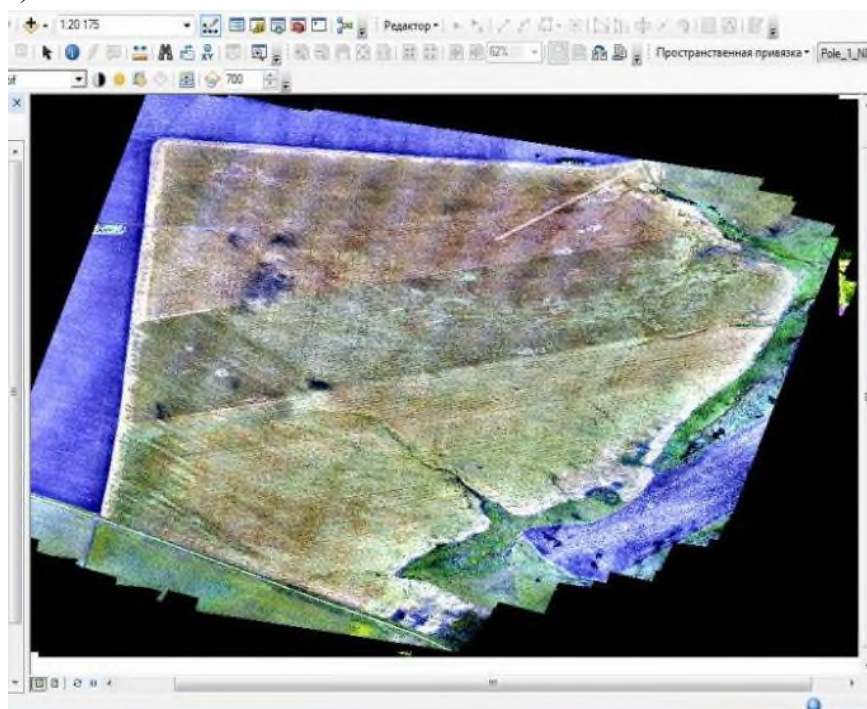


Рис. 5. Опорна ділянка у робочому вікні ArcGis 10.1 (ESRI Inc.)

Джерело: [16].

У цифровому ГІС-середовищі можна представити ключові структурні компоненти агроландшафтів, такі як рельєф місцевості, ґрунтовий покрив, геологічні породи, типи сільськогосподарських культур та інші просторові характеристики, кожен із яких розміщується у вигляді окремих інформаційних шарів [17]. Додатково в атрибутивних таблицях зберігаються кількісні та якісні показники, що характеризують окремі елементи ландшафту, що дозволяє здійснювати всебічний аналіз їхнього стану та змін у динаміці (рис. 6).

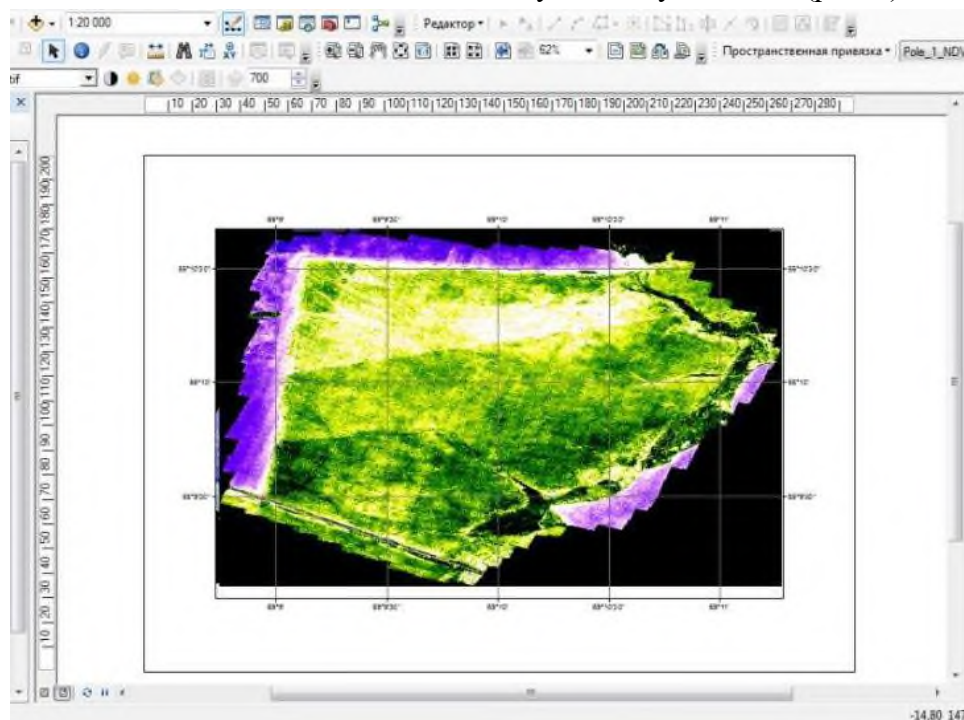


Рис. 6. Розрахунок індексу NDVI у ГІС в межах поверхні
(Agisoft PhotoScan Professional Edition)

Джерело: [16].

Крім того, технології дистанційного зондування за допомогою БПЛА дають змогу ідентифікувати склад вирощуваних культур, оцінювати стан їхнього розвитку, виявляти локальні осередки захворювань рослин та зараження посівів шкідниками, визначати області ущільнення ґрунту, що призводять до зниження врожайності на окремих ділянках. Ці можливості роблять БПЛА важливим інструментом для постійного моніторингу сільськогосподарських територій, що дозволяє не лише фіксувати поточний стан земель, а і прогнозувати можливі ризики та ефективно їх мінімізувати. Отримані аерофотоматеріали є цінним джерелом просторової інформації, що дає змогу аналізувати динаміку змін у землекористуванні, моделювати тенденції сільськогосподарського освоєння територій та оцінювати рівень агрогенної трансформації природних ландшафтів [17].

Особливе значення БПЛА-знімання набуває в межах розвитку точного (прецизійного) землеробства, що базується на адаптивно-ландшафтному підході до управління земельними ресурсами. Використання цих технологій дає можливість ефективно реалізовувати заходи з екологічно безпечного сільськогосподарського виробництва, забезпечувати сталий розвиток агроландшафтів, мінімізувати ризики, пов'язані з природними факторами, а також підвищувати рівень економічної та екологічної ефективності аграрного виробництва. Завдяки використанню сучасних технологій дистанційного зондування, зокрема супутникового моніторингу та БПЛА-знімання, аграрії отримують можливість оцінювати ці неоднорідності на рівні окремих ділянок, що дозволяє більш точно визначати потребу в поливі, коригувати норми внесення добрив і засобів захисту рослин та ухвалювати обґрунтовані управлінські рішення щодо кожного поля.

Висновки. Результати дослідження демонструють, що використання сучасних методів дистанційного зондування, таких як супутниковий моніторинг та знімання з БПЛА, суттєво оптимізує управління земельними ресурсами. Ці технології забезпечують оперативну оцінку стану земель та довгостроковий аналіз їхнього використання. Зокрема, супутникові знімки й аерофотознімання з БПЛА дозволяють детально досліджувати стан угідь, відстежувати динаміку сільськогосподарських територій, прогнозувати обсяги врожаю та виявляти потенційні екологічні ризики. Під час аналізу порівняно переваги та обмеження двох методів: супутникового знімання (масштаб охоплення, можливість відстеження глобальних змін у землекористуванні, оцінка стану рослинності) та БПЛА-знімання (висока деталізація, локальний моніторинг деградованих зон, аналіз вологості ґрунтів, спостереження за агроландшафтами). Супутникові дані ефективні для широко-масштабного аналізу, тоді як безпілотники забезпечують точність на мікрорівні.

Дослідження акцентує на технологіях обробки даних дистанційного зондування, зокрема застосуванні ГІС для створення цифрових моделей рельєфу, агроекологічного моделювання та прогнозування змін у земельному покриві. Комбінація супутникових даних із результатами БПЛА-знімання формує комплексний інструментарій для виявлення ризиків: ерозії, засолення, нерівномірного розвитку рослинності, втрат урожаю. Підкреслено доцільність інтегрованого підходу до моніторингу земель, який поєднує супутникові технології і ГІС-аналітику. Така синергія підвищує точність даних, скорочує витрати на польові роботи та сприяє раціональному використанню земельних ресурсів.

Список використаних джерел

1. Дружинін, Є. А., Ковалевський, М. І., Погудіна, О. К., & Черановський, В. О. (2021). Методи та інформаційні технології впровадження безпілотних літальних апаратів в повітряний простір України. *Системи озброєння і військова техніка*, (4 (68)), 84–90. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.68.12>.
2. Quamar, M. M., Al-Ramadan, B., Khan, K., Shafiullah, M., & El Ferik, S. (2023). Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information System Technology—A Review. *Remote Sensing*, 15(20), 5039. <https://doi.org/10.3390/rs15205039>.
3. Nguyen, Q. L., Dang, M. T., Bui, L. K., & Bui, Q. N. (2023). Application of unmanned aerial vehicles for surveying and mapping in mines: A review. In *Advances in Geospatial Technology in Mining and Earth Sciences: Selected Papers of the 2nd International Conference on Geo-spatial Technologies and Earth Resources 2022* (pp. 1-22). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-20463-0_1.
4. Van Alphen, R., Rains, K. C., Rodgers, M., Malservisi, R., & Dixon, T. H. (2024). UAV-based wetland monitoring: multispectral and lidar fusion with random forest classification. *Drones*, 8(3), 113. <https://doi.org/10.3390/drones8030113>.
5. Liu, C., Li, X., Xue, Y., Lu, W., & Zhang, C. (2024). Development and applications of an integrated space-air-ground observation network in natural resource monitoring and supervision. *E3S Web of Conferences*, 520, 04018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452004018>.
6. Ямелинець, Т. (2022). *Інформаційне ґрунтознавство*. ЛНУ ім. Івана Франка. <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/05/YAmelynets-Informatsiye-gruntozn-2022-book1.pdf>.
7. Спіцина, А., Плукар, Л., Маслиган, О., Мороз, Т., Касьмін, Д., & Назаренко, І. (2022). Цифровізація економіки як фактор стійкого розвитку держави на тлі масштабної воєнної агресії (український досвід). *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 6(47), 304–315. <https://doi.org/10.55643/fcapter.6.47.2022.3938>.
8. Македон В. В., & Байлова О. О. (2023). Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*, (47), 16–26. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3>.
9. Tomczyk, A. M., Ewertowski, M. W., Creany, N., Ancin-Murguzur, F. J., & Monz, C. (2023). The application of unmanned aerial vehicle (UAV) surveys and GIS to the analysis and monitoring of recreational trail conditions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 123, 103474. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103474>.

10. Kudaibergenov, O. (2024). Analysis of the Use of Satellite Data and Drones for Land Monitoring in Kazakhstan. *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202410.1229.v1>
11. *GIS for Land Administration & Land Records*. (б. д.). GIS Software for Mapping and Spatial Analytics – Esri. <https://www.esri.com/en-us/industries/land-administration/overview>.
12. *All maps*. (б. д.). USGS. <https://www.usgs.gov/products/maps/all-maps>.
13. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunen, N., & Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
14. Liu, R., Jia, K., Li, H., & Zhang, J. (2024). Using unmanned aerial vehicle data to improve satellite inversion: A study on soil salinity. *Land*, 13(9), 1438. <https://doi.org/10.3390/land13091438>.
15. Hutsuliak, H., Hutsuliak, Y., & Oliinyk, H. (2021). Prerequisites for creating the agricultural land resources monitoring system. *Balanced Nature Using*, (4), 71–76. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2021.253089>.
16. *Landsat next defined. Landsat science*. (б. д.). Landsat Science. A joint NASA/USGS Earth observation program. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/landsat-next-defined>.
17. Македон, В. В., Валіков, В. П., & Федьора, С. С. (2019). Удосконалення управління промисловими підприємствами на основі стратегій інноваційного розвитку. *Європейський вектор економічного розвитку*, 1(26), 108–123. <https://doi.org/10.32342/2074-5362-2019-1-26-8>.
18. Sun, J., Yuan, G., Song, L., & Zhang, H. (2024). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Landslide Investigation and Monitoring: A Review. *Drones*, 8(1), 30. <https://doi.org/10.3390/drones8010030>.
19. Braslavskaya, O., Dets, T., & Rozhi, T. (2023). The role of geodesy in the development of drone technologies for measuring, mapping and monitoring territories. *Spatial Development*, (5), 268–285. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.5.268-285>.
20. Shevchuk, S., Prokopenko, N., & Rozhi, T. (2024). Analysis of the use of geodesic data in the planning and monitoring of agricultural landscapes: Optimization of land use and nature protection. *Spatial Development*, (7), 445–458. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.7.445-458>.
21. Rozhi, I., Rozhi, T., & Fedii, O. (2024). Geodesic aspects of the creation of digital relief models for the needs of geo-information systems. *Spatial Development*, (8), 477–491. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.477-491>.
22. Shevchuk, S., Domashenko, H., & Rozhi, T. (2024). Modern methods of geodesic mapping of territories: Use of gps and gnss technologies. *Spatial Development*, (8), 506–517. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.506-517>.
23. Kyrlyuk, V., Rozhi, T., & Khariv, V. (2023). Geodetic planning in the agricultural landscape: Creation of digital maps and models for land use optimization. *Spatial Development*, (6), 293–308. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.6.293-308>.

References

1. Druzhynin, Ye. A., Kovalevskyi, M. I., Pohudina, O. K., & Cheranovskyi, V. O. (2021). Metody ta informatsiyni tekhnolohiyi vprovadzhennya bezpilotnykh lital'nykh apparativ v povitryannyi prostir Ukrainy [Methods and information technologies for integrating unmanned aerial vehicles into Ukraine's airspace]. *Systemy ozbroynennya i viys'kova tekhnika – Weapons and Military Equipment Systems*, (4 (68)), 84–90. <https://doi.org/10.30748/soivt.2021.68.12>.
2. Quamar, M. M., Al-Ramadan, B., Khan, K., Shafiullah, M., & El Ferik, S. (2023). Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information System Technology—A Review. *Remote Sensing*, 15(20), 5039. <https://doi.org/10.3390/rs15205039>.
3. Nguyen Q. L., Dang M. T., Bui L. K., & Bui Q. N. (2023). Application of unmanned aerial vehicles for surveying and mapping in mines: A review. In *Advances in Geospatial Technology in Mining and Earth Sciences: Selected Papers of the 2nd International Conference on Geo-spatial Technologies and Earth Resources 2022* (pp. 1–22). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-20463-0_1.
4. Van Alphen, R., Rains, K. C., Rodgers, M., Malservisi, R., & Dixon, T. H. (2024). UAV-based wetland monitoring: multispectral and lidar fusion with random forest classification. *Drones*, 8(3), 113. <https://doi.org/10.3390/drones8030113>.

5. Liu, C., Li, X., Xue, Y., Lu, W., & Zhang, C. (2024). Development and applications of an integrated space-air-ground observation network in natural resource monitoring and supervision. *E3S Web of Conferences*, 520, 04018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452004018>.
6. Yamelynets, T. (2022). *Informatsiyne gruntoznavstvo: monohrafiya* [Informational soil science: monograph]. LNU imeni Ivana Franka – LNU named after Ivan Franko. <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/05/YAmelynets-Informatsiyne-gruntozn-2022-book1.pdf>.
7. Zghurska, O., Korchynska, O., Rubel, K., Kubiv, S., Tarasiuk, A., & Holovchenko, O. (2022). Tsyfrovyzatsiya natsional'noho ahropromyslovoho kompleksu: novi vyklyky, realiyi ta perspektyvy [Digitalization of the national agro-industrial complex: new challenges, realities, and prospects]. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 6(47), 304–315. <https://doi.org/10.55643/fcaptp.6.47.2022.3938>.
8. Makedon V. V., Bailova O. O. (2023). Planuvannya i orhanizatsiya vprovadzhennya syfrovykh tekhnolohiy v diyal'nist' promyslovykh pidpryyemstv [Planning and organizing the implementation of digital technologies in the activities of industrial enterprises]. *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu. Seriiia «Ekonomiczni nauky» – Scientific Bulletin of Kherson State University. Series "Economic Sciences"*, (47), 16-26. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3>.
9. Tomczyk, A. M., Ewertowski, M. W., Creany, N., Ancin-Murguzur, F. J., & Monz, C. (2023). The application of unmanned aerial vehicle (UAV) surveys and GIS to the analysis and monitoring of recreational trail conditions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 123, 103474. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103474>.
10. Kudaibergenov O. (2024). Analysis of the Use of Satellite Data and Drones for Land Monitoring in Kazakhstan. *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202410.1229.v1>.
11. *GIS for Land Administration & Land Records*. (б. д.). GIS Software for Mapping and Spatial Analytics – Esri. <https://www.esri.com/en-us/industries/land-administration/overview>.
12. *All maps*. (б. д.). USGS <https://www.usgs.gov/products/maps/all-maps>.
13. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunen, N., & Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(13(128)), 47–57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
14. Liu, R., Jia, K., Li, H., & Zhang, J. (2024). Using unmanned aerial vehicle data to improve satellite inversion: A study on soil salinity. *Land*, 13(9), 1438. <https://doi.org/10.3390/land13091438>.
15. Hutsuliak, H., Hutsuliak, Y., & Oliinyk, H. (2021). Prerequisites for creating the agricultural land resources monitoring system. *Balanced Nature Using*, (4), 71–76. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2021.253089>.
16. *Landsat next defined | landsat science*. (б. д.). Landsat Science | A joint NASA/USGS Earth observation program. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/landsat-next-defined>.
17. Makedon, V. V., Valikov, V. P., Fedyora, S. S. (2019). Udoskonalennya upravlinnya promyslovymy pidpryyemstvamy na osnovi stratehiy innovatsiynoho rozvytku [Improving the management of industrial enterprises based on innovative development strategies]. *Yevropeiskyi vektor ekonomichnoho rozvytku – European vector of economic development*, 1(26), 108–123. <https://doi.org/10.32342/2074-5362-2019-1-26-8>.
18. Sun, J., Yuan, G., Song, L., & Zhang, H. (2024). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Landslide Investigation and Monitoring: A Review. *Drones*, 8(1), 30. <https://doi.org/10.3390/drones8010030>.
19. Braslavskaya, O., Dets, T., & Rozhi, T. (2023). The role of geodesy in the development of drone technologies for measuring, mapping and monitoring territories. *Spatial Development*, (5), 268–285. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.5.268-285>.
20. Shevchuk, S., Prokopenko, N., & Rozhi, T. (2024). Analysis of the use of geodesic data in the planning and monitoring of agricultural landscapes: Optimization of land use and nature protection. *Spatial Development*, (7), 445–458. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.7.445-458>.
21. Rozhi, I., Rozhi, T., & Fedii, O. (2024). Geodesic aspects of the creation of digital relief models for the needs of geo-information systems. *Spatial Development*, (8), 477–491. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.477-491>.

22. Shevchuk, S., Domashenko, H., & Rozhi, T. (2024). Modern methods of geodesic mapping of territories: Use of gps and gnss technologies. *Spatial Development*, (8), 506–517. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.8.506-517>.

23. Kyrlyiuk, V., Rozhi, T., & Khariv, V. (2023). Geodetic planning in the agricultural landscape: Creation of digital maps and models for land use optimization. *Spatial Development*, (6), 293–308. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.6.293-308>

Отримано 20.03.2025

UDC 528.8:681.518

Valentyn Borovyi¹, Oksana Braslavska², Tomas Rozhi³

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geography, Geodesy and Land Management
Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University (Uman, Ukraine)

E-mail: v.o.borovyi@udpu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0965-6313>

²Doctor of Pedagogical Sciences, Professor of the Department of Geography, Geodesy and Land Management
Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University (Uman, Ukraine)

E-mail: oksana.braslavska@udpu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0852-686X>

³Lecturer at the Department of Geography, Geodesy and Land Management
Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, (Uman, Ukraine)

E-mail: tomas.rozhi.94@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6794-9662>

SATELLITE AND UAV SURVEYING AS TOOLS FOR MONITORING LAND RESOURCES: MODERN TECHNOLOGIES AND THEIR APPLICATION IN UKRAINE

The article analyzes innovative methods of remote sensing of land resources, in particular satellite imaging and the use of unmanned aerial vehicles (UAVs), which ensure increased efficiency of land resource management through operational monitoring of the state of territories, analysis of the dynamics of changes in land use and a comprehensive assessment of environmental indicators, which together contribute to the optimization of management decisions. It is established that the integration of satellite technologies, characterized by wide coverage and systematic data updating, with highly detailed UAV imaging, focused on local research, forms a comprehensive mechanism for collecting and processing geospatial information, which not only increases the accuracy of monitoring, but also provides for the prediction of structural changes in land use, taking into account environmental, social and economic factors. The study conducted a comparative analysis of the advantages and limitations of satellite and aerial photography, where the key parameters considered were spatial resolution, which determines the scale of the analysis, regularity of data acquisition, which ensures the relevance of information, dependence on atmospheric conditions, which limits the efficiency of the survey, and the cost of using technologies, which affects the accessibility of methods for different categories of users. Based on the results obtained, the critical need for the implementation of geographic information systems (GIS) for automated processing of remote sensing data sets was argued, which allows not only to identify areas of soil degradation, assess their moisture level and track the phenological cycles of agricultural crops, but also to integrate these data into climate change adaptation strategies. A model for the application of remote sensing is proposed, which is based on algorithms for collecting, processing and visualizing data obtained from satellite images and UAV aerial photography, which provides cost-effectiveness by reducing the cost of field research, increasing the accuracy of analysis through a combination of macro-scale and local data, and minimizing environmental risks associated with soil degradation and biodiversity loss.

Keywords: remote sensing, satellite imaging, unmanned aerial vehicles, geographic information systems, land resources monitoring, land use

Fig.: 6. Table: 1. References: 23.

Віталій Іванович Зацерковний¹, Ігор Романович Ніколюк²

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геоінформатики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка ННІ «Інститут геології» (Київ, Україна)
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>. ScopusID: 57200165109

²аспірант 1 року навчання, спеціальність 193 – Геодезія та землеустрій
Київський національний університет імені Тараса Шевченка ННІ «Інститут геології» (Київ, Україна)
E-mail: nikoliuk.igor@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0750-2603>. ResearcherID: rid105343

ВИКОРИСТАННЯ БПЛА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ ТА ПОБУДОВИ КАРТ ПРИ ГУМАНІТАРНОМУ РОЗМІНУВАННІ

Широкомасштабне вторгнення РФ спричинило безпрецедентне забруднення території України вибухонебезпечними предметами (ВНП), перетворивши її на одну з найбільш замінованих країн світу (близько 144 тис. км² потенційно небезпечні). Це становить довготривалу смертельну загрозу для цивільного населення, блокує соціально-економічне відновлення, особливо в аграрному секторі, руйнує інфраструктуру та завдає шкоди довкіллю.

Гуманітарне розмінування визначено як критично важливий процес для ліквідації цих загроз, що включає нетехнічне та технічне обстеження, картографування, маркування, знешкодження ВНП та інформування населення. Стаття підкреслює актуальність застосування сучасних технологій для оптимізації цього складного і небезпечного процесу.

Ключову роль у модернізації розмінування відіграють безпілотні літальні апарати (БПЛА). Вони дозволяють проводити дистанційне обстеження великих територій з мінімальним ризиком для людей. У статті детально розглянуто методи використання БПЛА: оснащення магнітометрами для виявлення металевих об'єктів, інфрачервоними (тепловими) сенсорами для фіксації температурних аномалій від ВНП, мультиспектральними та гіперспектральними камерами для аналізу змін у рослинності чи виявлення специфічних матеріалів. Згадано також георадари (GPR) та LiDAR.

Важливим аспектом є інтеграція даних з БПЛА з геоінформаційними системами (ГІС) та алгоритмами штучного інтелекту (ШІ). Це дозволяє створювати детальні ортофотоплани, цифрові моделі місцевості, автоматизовано аналізувати зображення, ідентифікувати потенційні загрози та будувати точні карти ризиків. Як приклад наведено дослідження території Петропавлівської ОТГ, де за допомогою БПЛА та ArcGIS було ідентифіковано вирви від вибухів, визначено небезпечні зони та створено 500-метрові буферні зони безпеки.

Незважаючи на певні виклики (наприклад, виявлення неметалевих мін), технології БПЛА демонструють високу ефективність та мають величезний потенціал для значного прискорення процесу очищення українських земель, збереження життів та сприяння повоєнному відновленню.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (БПЛА); вибухонебезпечні предмети (ВНП); гуманітарне розмінування; виявлення ВНП; геоінформаційні системи (ГІС); сенсори; дистанційне зондування.

Рис.: 19. Табл.: 2. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Широкомасштабне військове вторгнення Російської Федерації 24 лютого 2022 року в Україну спричинило безпрецедентне забруднення її територій вибухонебезпечними предметами (ВНП). Із самого першого дня російські агресори почали руйнувати економіку та інфраструктуру країни, завдаючи ударів по енергетичних, нафтопереробних та інших промислових і сільськогосподарських підприємствах, житлових будинках, які створювалися десятиліттями. Почали гинути ні в чому невинні люди, флора та фауна, знищуватися техніка, обладнання, руйнуватись інфраструктура міст і сіл.

Артилерійські обстріли нашої країни агресором дали зрозуміти всьому світу, що російські злочинці розв'язали геноцидну війну. А звірства росіян у Бучі, Ірпені, Гостомелі залишили гіркий біль у серцях українського народу й усього прогресивного людства. Масові захоронення людей, які були знайдені після деокупації, стали сигналом для всього цивілізованого світу, що Україна стримує навалу фашистів ціною життя свого народу [1].

Протягом усього періоду бойових дій, який триває й досі, агресор використовував і продовжує використовувати різноманітні види озброєння, залишаючи після себе нерозірвані боєприпаси, вибухонебезпечні залишки війни та мінні загородження.

Найбільш поширеними ВНП якими забруднені території Україні є міни (протипіхотні фугасні, протипіхотні осколкові, протитанкові, протитанкові дистанційні, мінометні, пастки), ручні гранати, артилерійські й реактивні снаряди, касетні боєприпаси, балістичні, авіаційні та протитанкові ракети, авіаційні бомби.

При їх детонації окислюються навколишні ґрунти, деревина, дернина, конструкції, а також утворюється низка хімічних сполук та токсичних органічних речовин. Під час вибуху всі речовини проходять повне окиснення, а продукти хімічної реакції вивільняються в атмосферу. В атмосфері оксиди сірки і азоту стають причиною кислотних дощів, що змінюють кислотність ґрунту і викликають опіки рослин, до яких особливо чутливими є хвойні дерева. Кислотні дощі негативно впливають і на організм людини, ссавців та птахів, на стан слизових тканин та органів дихання [2].

Основні наслідки від спрацювання ВВП представлені на рис. 1.

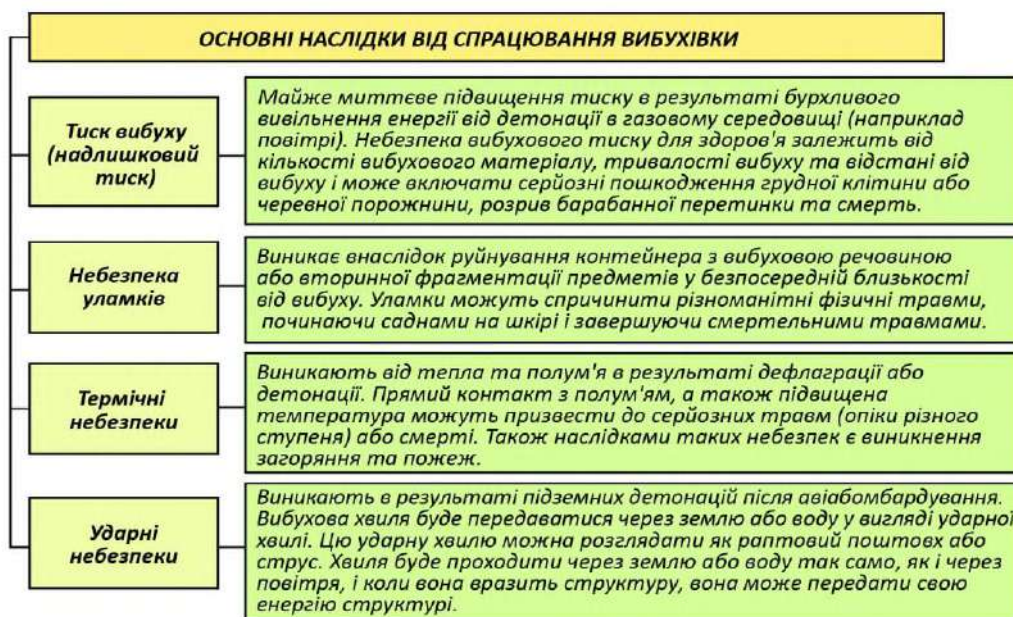


Рис. 1. Основні наслідки від спрацювання ВВП

Серед усього розмаїття ВВП, особливо небезпечними є міни, що встановлюються попри заборону згідно до «Конвенції про заборону або обмеження застосування конкретних видів звичайної зброї, які можуть вважатися такими, що завдають надмірних ушкоджень або мають невибіркову дію» та додаткового протоколу II до неї [3].

Перелік особливо небезпечних мін представлений на рис. 2.

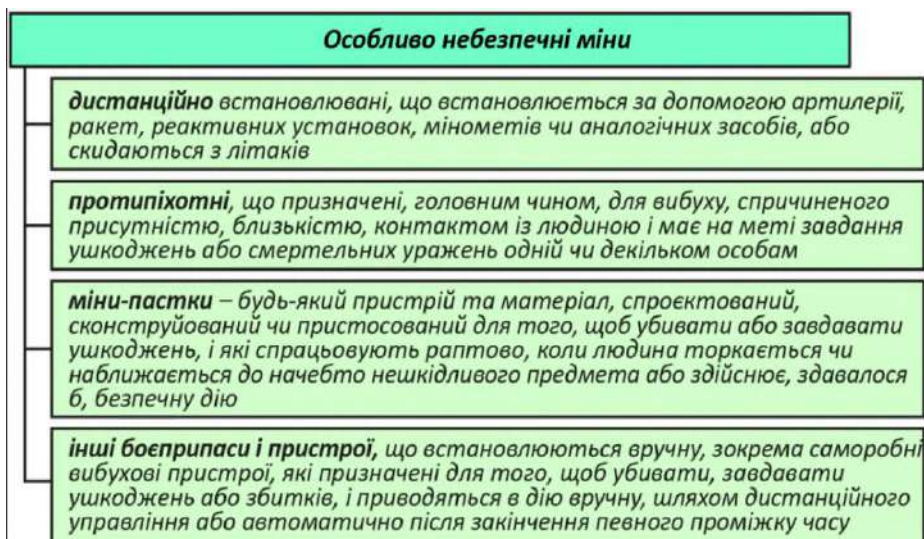


Рис. 2. Особливо небезпечні міни, що встановлюються попри заборону згідно з Конвенцією

Під розмінуванням розуміють процес повного знешкодження та утилізації мін, мін-пасток, саморобних вибухових пристроїв, які не розірвалися, вибухових предметів з певного району місцевості з метою забезпечення безпеки цивільного населення. На морі для розмінування часто використовують тральники, а для очищення сухопутних ділянок залучаються інженерні підрозділи, сапери, служба з надзвичайних ситуацій (у складі якої є відповідні підрозділи). Розмінування може проводитися вручну або механічним способом за допомогою спецмашин [4].

Виділяють три види розмінування (рис. 3).

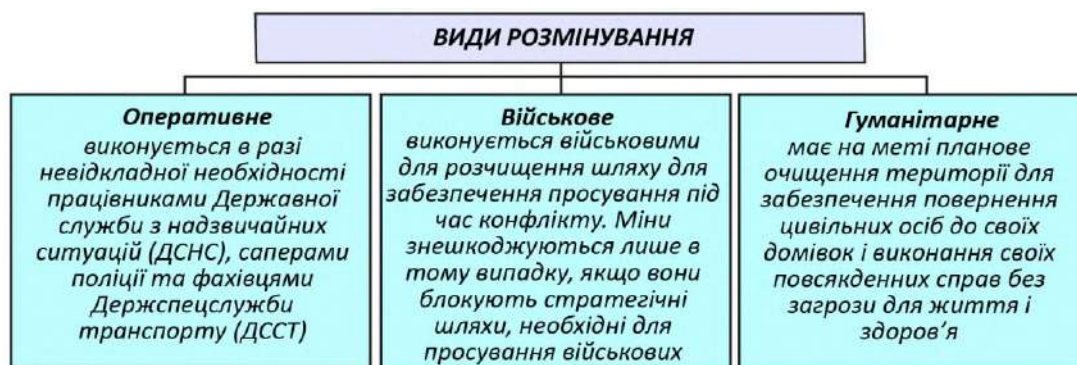


Рис. 3. Види розмінування

Гуманітарне розмінування – це один з основних компонентів протимінної діяльності, який передбачає дослідження, картографування та маркування мінних полів із наступним фактичним розмінуванням територій та інформуванням населення про мінну небезпеку. Цей процес потребує значних зусиль, координації дій між державними органами та міжнародною співпрацею. Від ефективності розмінування залежить не тільки безпека громадян, але й можливість відновлення інфраструктури та економіки в цілому на деокупованих територіях. Це питання національної безпеки.

З огляду на те, що на сьогодні замінованими залишаються близько 30 % території України. МВС та МО створило Міжнародний координаційний центр з гуманітарного розмінування. До цього процесу залучені всі сили МВС – підрозділи ДСНС, Нацполіції, сапери Нацгвардії. У 2024 році було створено Коаліцію протимінної діяльності за участю 22 країн НАТО, що сприяє посиленню координації та залученню додаткових ресурсів для розмінування. Крім того, зростає кількість сертифікованих операторів протимінної діяльності, що позитивно впливає на темпи розмінування. Актуальність гуманітарного розмінування представлена на рис. 4.

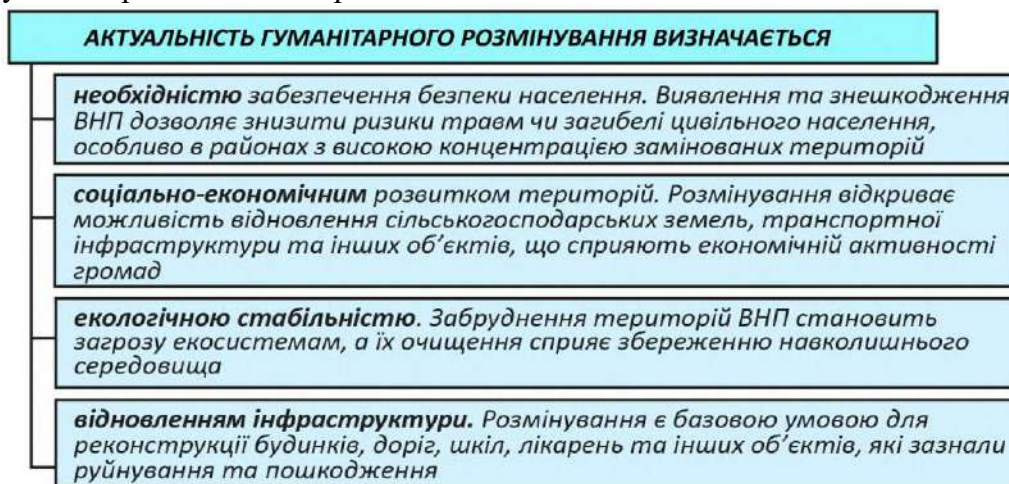


Рис. 4. Необхідність гуманітарного розмінування

Цілі гуманітарного розмінування відповідно Закону України від 06.12.2018 № 2642-VIII представлені на рис. 5.



Рис. 5. Цілі гуманітарного розмінування

Через мінну загрозу унеможлиблюється повернення внутрішньо переміщених осіб, відбудова інфраструктури, відновлення сільського господарства та промисловості. За оцінками Світового банку, на повне розмінування України може знадобитися понад 34,6 млрд дол. США, а процес може тривати десятиліттями [5].

Постановка проблеми. За даними Огляду протимінної діяльності 2023 року, Україна належить до країн із найвищим рівнем забруднення ВВП, перевершуючи навіть ті держави, де військові конфлікти тривають десятиліттями. Україна набула статусу однієї з найбільш забруднених (замінованих) країн світу. ВВП забруднені Чернігівська, Дніпропетровська, Донецька, Харківська, Херсонська, Київська, Луганська, Миколаївська, Одеська, Сумська та Запорізька області.

Площа потенційно забруднених територій на 1.01.2024 р. складала 156 тис. км², що становить близько чверті загальної площі країни [6]. Проте, вже станом на липень 2024 року зазначена площа становила 144 тис. км². Ці цифри зазнають постійних змін в ту чи іншу сторону, оскільки тривають бойові дії [7].

Попри наявність певної кількості досліджень, конкретні методи і результати гуманітарного розмінування потребують подальших наукових вишукувань, розробки ефективних методів і технологій очищення територій від ВВП, застосування технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), зокрема використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для оптимізації процесів розмінування.

Незважаючи на значний прогрес, досягнутий у сфері гуманітарного розмінування в Україні, залишається ще низка викликів. Російські війська продовжують залишати мінні пастки навіть у цивільних будівлях, навчальних закладах та критичній інфраструктурі. Це ускладнює процес розмінування та потребує залучення ще більшої кількості фахівців і ресурсів. Також активно ведеться робота з інформування населення щодо ризиків, пов'язаних із ВВП, адже нерідко люди наражаються на небезпеку через брак знань про те, як діяти в потенційно небезпечних зонах.

Методи виявлення мін [8] представлені на рис. 6.

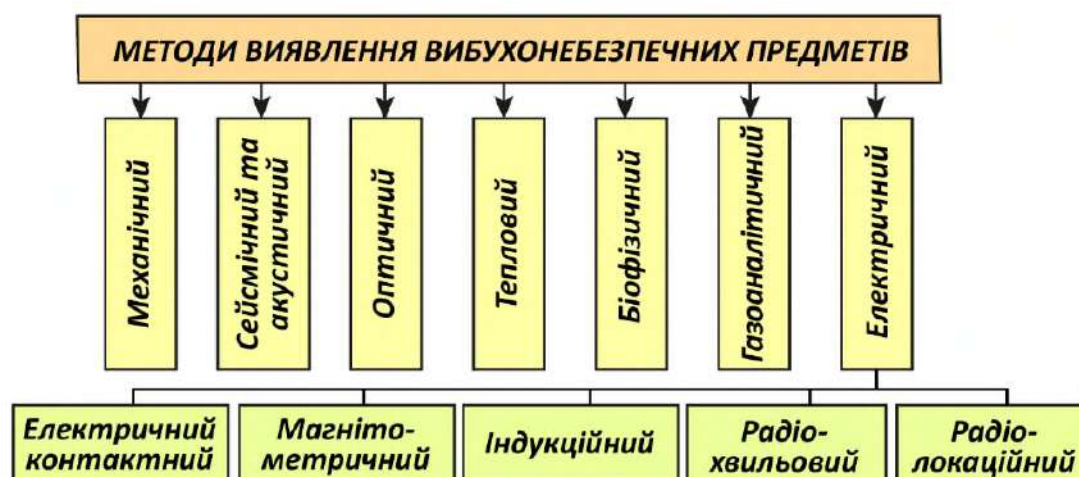


Рис. 6. Методи виявлення мін

Жоден із перерахованих методів не є універсальним, однак їх поєднання дозволяє підвищити ефективність розмінування. Подальше вдосконалення методів розмінування бачиться в інтеграції різних технологій у єдину систему.

Сучасні технології виявлення ВВП розширюють за рахунок їх дистанційного виявлення, зокрема за допомогою БПЛА. Організація Об'єднаних Націй визнала БПЛА реальним інструментом для протимінної діяльності. Алгоритм і етапи застосування БПЛА в процесі гуманітарного розмінування в загальному випадку представлений на рис. 7.

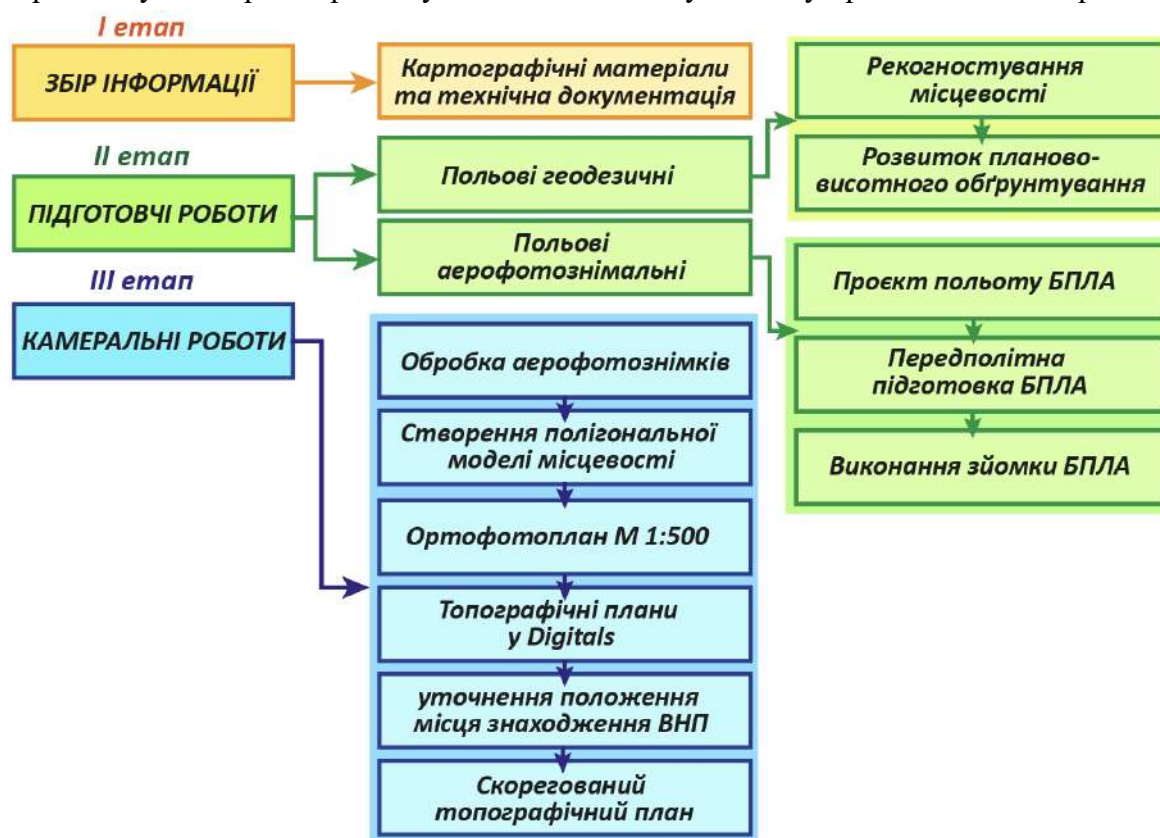


Рис. 7. Алгоритм і етапи застосування БПЛА в процесі гуманітарного розмінування

Метою статті є огляд ефективності та підходів до застосування БПЛА для виявлення ВНП та створення карт небезпечних територій в контексті гуманітарного розмінування в Україні.

Виклад основного матеріалу. Основні підходи до використання БПЛА для виявлення ВНП представлені на рис. 8.

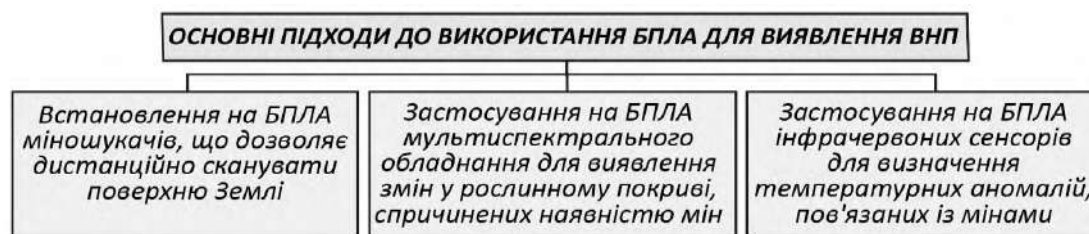


Рис. 8. Основні підходи до використання БПЛА для виявлення ВНП

Використання штучного інтелекту та геоінформаційних технологій дозволяє створювати карти мінних полів на основі аналізу супутникових знімків та даних від БПЛА. Крім того, перспективним напрямком є розробка автономних систем розмінування, які можуть працювати без безпосередньої участі людей.

При використанні БПЛА для виявлення ВНП керування ним відбувається з безпечної території (рис. 9).



Рис. 9. Проведення обстеження місцевості для виявлення ВНП за допомогою БПЛА

На додаток маршрут польоту обирається таким чином, щоб БПЛА не підлітав ближче заявлених тактико-технічних характеристик до дерев та ліній електропередач, виконував роботи щодо обстеження території в межах визначеної ділянки місцевості.

У разі втрати керування БПЛА і його падіння на небезпечну територію, забороняється йти по нього. Повернути втрачений БПЛА можна за допомогою іншого БПЛА на якому буде закріплено мотузку з гаком. У разі відсутності запасного БПЛА необхідно рухатись до втраченого БПЛА найкоротшим шляхом попередньо очищеним технічними засобами пошуку ВНП.

Залежно від висоти зйомки території розрізняють три основні методи виявлення ВНП: космічна зйомка, повітряна зйомка та зйомка БПЛА. Завдяки автономній роботі та зниженню людського фактора, БПЛА забезпечують ефективне сканування території з мінімальним відсотком помилок. Крім того, вони виступають платформами для збору даних ДЗЗ, що дозволяє отримувати інформацію про певні об'єкти без фізичного контакту.

Поєднання супутникових даних із даними, отриманими з БПЛА, значно покращує розуміння динаміки змін на поверхні Землі. Оскільки кожна з цих технологій має свої особливості, їх інтеграція дозволяє досягати оптимального балансу між розрізненністю, прямою видимістю та співвідношенням сигнал/шум.

Використання БПЛА для розмінування стало можливим завдяки розвитку авіоніки, збільшенню ємності акумуляторів, застосування композитних матеріалів, новітніх навігаційних систем та програмного забезпечення. Розвиток телекомунікаційних технологій, зокрема 5G та Інтернету речей (IoT), відіграє ключову роль у забезпеченні повітряного зв'язку БПЛА, розширенні мережевого покриття та підвищенні обчислювальних можливостей.

БПЛА можуть бути оснащені різноманітними датчиками, наприклад, камерами високої роздільної здатності, LiDARами, GNSS та інерціальними вимірювальними пристроями. Для аналізу досліджуваної території застосовуються мультиспектральні, гіперспектральні, теплові інфрачервоні камери та радіолокаційні системи. Камери високої розрізненості дозволяють визначати розташування мін завдяки методам прямого дешифрування. Наприклад, частково закопані міни можна виявити за слідами на полі, сухій траві серед зеленої рослинності, а також за аномальними змінами кольору, текстури та форми поверхні.

Використання стереоскопічних знімків дає можливість створювати тривимірні моделі місцевості, що значно покращує процес аналізу отриманих даних. Крім того, автоматизовані алгоритми та штучний інтелект дозволяють підвищити точність обробки та інтерпретації зображень.

Технології БПЛА розширилися від простих технічних оглядів до детального обстеження полів перед розмінуванням. За останні 5–10 років їх застосування значно зросло, що сприяло розвитку нових методів гуманітарного розмінування.

Сьогодні не існує повністю автоматизованих рішень для виявлення нерозірваних боєприпасів за допомогою тепловізорів, однак застосування штучних нейронних мереж показало високу ефективність ідентифікації ВНП. Іншою перспективною технологією є гіперспектральне зондування, що дозволяє реєструвати спектральні характеристики поверхні Землі. Так ЗС США запустили програму HMDP, спрямовану на виявлення мін за допомогою гіперспектрального аналізу, що дозволило зібрати значний масив даних про спектральні характеристики ВНП.

Перелік наявних технологій дистанційного виявлення ВНП представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Новітні технології, що використовуються в гуманітарному розмінуванні

Методи виявлення мін	Опис	Тип обладнання	Переваги
Інфрачервона (ІЧ) технологія	Використовує різницю в ІЧ-випромінюванні між мінами та навколишнім ґрунтом, особливо помітно на недавно закладених мінах	ІЧ-камери на БПЛА	Чутливість до температурних змін, здатність виявляти міни за допомогою різниці теплових характеристик поверхні.
Гіперспектральні датчики	Використовує камери з можливістю реєстрації електромагнітного спектра в широкому діапазоні	БПЛА з гіперспектральними камерами	Здатність розрізняти матеріали, які не видно в звичайному спектрі, точніші зображення
Георадар (GPR)	Виявляє закопані об'єкти за допомогою рефлектометрії та мікрохвильових хвиль.	Георадар на БПЛА	Розширений діапазон глибини виявлення, не залежить від металу, здатність працювати на різних типах ґрунтів

На рис. 10 як приклад представлено застосування БПЛА з магнітометром в процесі обстеження території та наступної візуалізації й обробки даних просторового вишукування ВНП.



Рис. 9. БПЛА з магнітометром у процесі обстеження території (а) та візуалізації та обробки даних просторового пошуку (б)

Джерело: [9].

На сьогодні, в Україні для виявлення ВНП вже активно розробляються спеціальні магнітометричні датчики для БПЛА, які працюють на висоті 5-10 м, здатні не лише локалізувати ВНП, а й точно ідентифікувати їх контури. Такі системи продемонстрували високу точність у виявленні мін калібру 82 мм та 120 мм, з точністю до сантиметра (за умови відсутності рослинності), що робить їх надзвичайно ефективними в гуманітарному розмінуванні. Крім того, вони мають значну перевагу в порівнянні з іншими методами, оскільки здатні працювати незалежно від часу доби і передавати дані в реальному часі, що дозволяє швидше скласти карти мінних полів.

Виявлення мін за допомогою БПЛА, обладнаного магнітометром під час польових випробувань (а) та отриманої карти мінного поля з ідентифікованими ВНП та мінами поблизу (б) представлено на рис. 11.

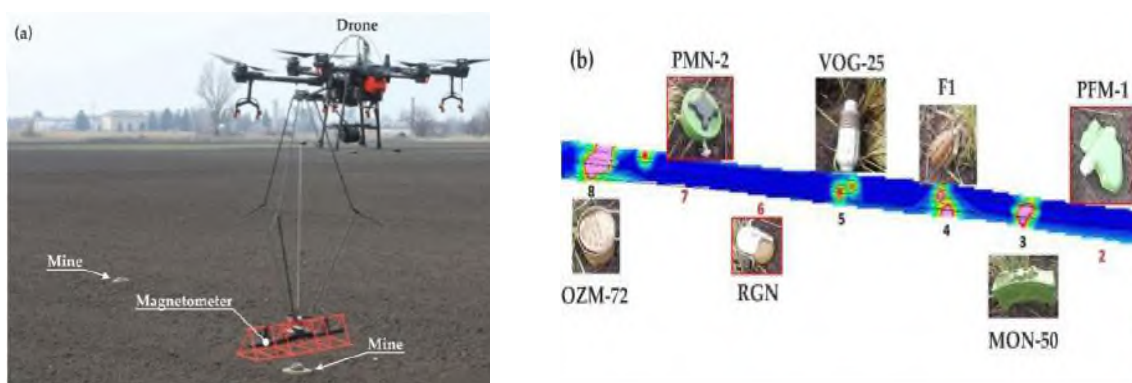


Рис. 11. Виявлення мін за допомогою безпілотного літального апарату (БПЛА), обладнаного магнітометром, під час польових випробувань (а) та отриманої карти мінного поля з ідентифікованими вибухонебезпечними об'єктами та мінами поблизу (б)

Джерело: [10].

У рамках співпраці з польським благодійним фондом «Поступ», розроблено магнітометричну систему, суміщену з БПЛА. Ця система дозволяє виявляти міни на глибині до 50-60 см, що є корисним для виявлення протитанкових мін. Однак система не завжди здатна виявити міни з невеликою кількістю металу, зокрема, ПФМ-1 та ПФМ-2.

Прогресивним досягненням на сьогодні є спільний проєкт канадської компанії DraganFly та українського фонду «Жовто-Блакитні», який передбачає використання БПЛА, оснащених дистанційними датчиками для виявлення мін на глибині до 3 м. Система використовує штучний інтелект для адаптації зібраних даних і формує тривимірні карти аномалій, що дозволяють визначити наявність мін на основі форми, розміру та матеріалу (рис. 12).

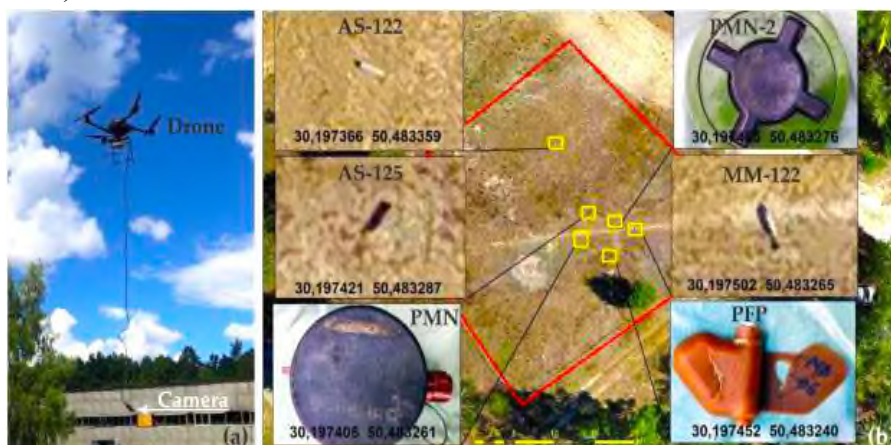


Рис. 12. Виявлення мін за допомогою безпілотного літального апарату (БПЛА), обладнаного магнітометром, у процесі обстеження території (а) та за результатами ідентифікації мінно-вибухонебезпечних предметів (б) на обстежуваній території Джерело: [11].

У результаті ефективність такої системи наближається до 100 %, а процес збору даних займає близько 1 години на 1 га.

Окремо варто відзначити розробки Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, який працює над вдосконаленням технології дистанційного виявлення мін за допомогою багатоспектральної зйомки. У результаті проведених випробувань, методика отримала високу точність у виявленні мін і вибухонебезпечних предметів. Система, що поєднує мультиспектральну та інфрачервону камери, забезпечує точність виявлення понад 90 % [12].

Використання БПЛА та результатів аналізу супутникових знімків під час обстеження забруднених ВВП унормовано на рівні державного стандарту (ДСТУ 8820-5:2924 «Протимінна діяльність. Процеси управління. Частина 5. Процеси вивільнення територій «ленд-реліз»).

Одним із перспективних напрямків виявлення ВВП є розробка роботів-саперів, що можуть використовуватися разом з БПЛА для покращення ефективності пошуку та знешкодження мін. Такі роботи можуть працювати в умовах складного рельєфу, а також на великих площах.

Підсумовуючи наведене, можна стверджувати, що Україна активно розвиває технології виявлення мін за допомогою БПЛА, і вже на сьогодні ці технології демонструють високу ефективність, зокрема, в умовах постконфліктних територій. Використання БПЛА в гуманітарному розмінуванні має великий потенціал для зменшення ризиків та прискорення процесу очищення територій від вибухонебезпечних предметів.

Розробка картосхем замінованих територій України. На підставі даних протимінної діяльності ДСНС було створено карту замінованих територій (рис. 13), на якій відображені місця, де вже було виявлено або теоретично знаходяться вибухонебезпечні предмети.

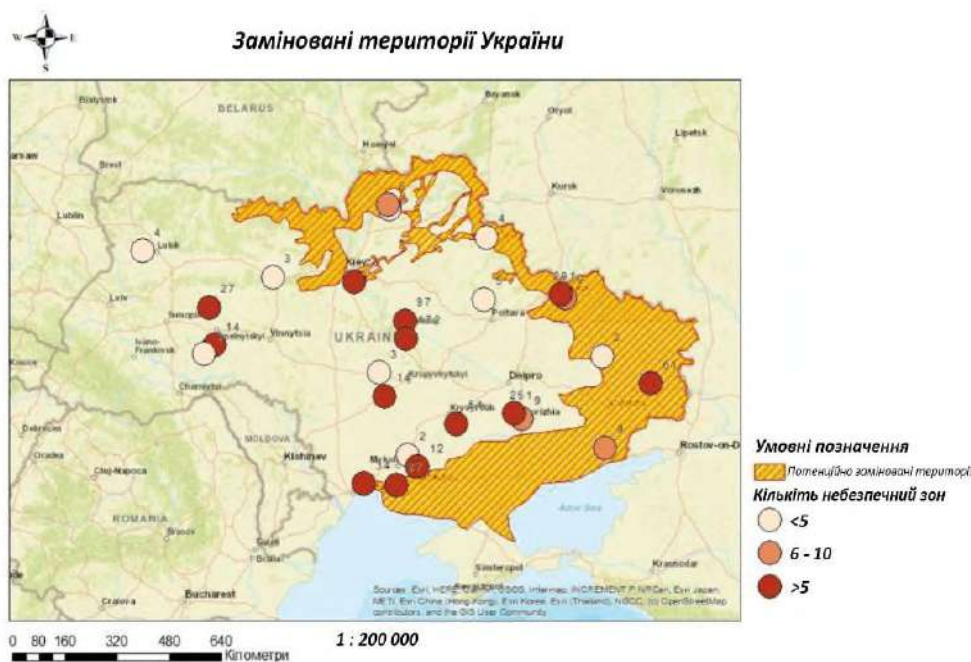


Рис. 13. Картосхема замінованих територій України.

Джерело: розроблено авторами на основі карти Open Street Map.

На карті вказано ступінь загрози кожного з регіонів. Найбільш забруднені області знаходяться безпосередньо в зоні бойових дій та в районах деокупованих територій: Київська, Чернігівська, Сумська, Харківська, Луганська, Донецька, Запорізька, Херсонська та Миколаївська області.

Карта замінованих територій України є важливим інструментом для аналізу ризиків та розробки стратегій з розмінування. Її створення базується на комплексному використанні геодезичних даних, супутникових знімків та інших технологій для точного визначення місцезнаходження замінованих об'єктів.

Слід зауважити, що замінованими територіями наразі можуть бути не тільки зони безпосередніх бойових дій, а й ліси та парки, поля й лісосмуги, зони інфраструктури, території біля мостів та переправ, будь-які водойми, зокрема ставки, річки та криниці, залишені бойові позиції, траншеї, контрольно-пропускні пункти та блокпости, військові та стратегічні об'єкти, знищені транспортні засоби та покинуті будівлі. Особливу небезпеку становлять так звані мініпастки, що їх встановлюють окупанти у будівлях при відступі чи зміні позицій. Трапляється, що заміновані таким чином об'єкти легше підірвати, ніж розмінувати.

Мінний терор – це форма російського терору, якій Україна буде змушена протидіяти продовж багатьох років. Загарбники свідомо намагаються залишити після себе якнайбільше смертельних пасток. Це, зокрема, і закопані «фугаси», і розтяжки, і заміновані житлові об'єкти, і транспорт [13].

На сьогодні в Україні потенційно забруднена мінами територія складає близько 139 000 км². Через заміновані поля економіка зазнає 11,2 млрд дол. США щорічних збитків [7].

Однією з ключових галузей національної економіки України є сільське господарство. Разом з переробною промисловістю воно забезпечує третину ВВП. При цьому на землі сільськогосподарського призначення України припадало 41,3 млн га – 68,5 % від загальної площі України. З цих сільськогосподарських угідь 32,7 млн га були орними землями (рілля).

Після початку повномасштабної війни все змінилося. Російська агресія завдала нищівного удару по українській сільськогосподарській галузі, що має глобальні наслідки. До війни Україна входила до трійки лідерів світового експорту усіх зернових культур і забезпечувала продовольством майже 400 млн людей у всьому світі. Блокада українських портів, руйнування сільськогосподарської інфраструктури та техніки, а також заміновані поля, які неможливо обробляти, призвели до продовольчої кризи на глобальному рівні та сприяли зростанню цін на продовольство.

Згідно з останніми розрахунками Центру досліджень продовольства та землекористування Київської школи економіки (KSE Агроцентр), проведеними спільно зі Світовим банком, український аграрний сектор зазнав понад 80 млрд дол. США прямих збитків та втрат унаслідок повномасштабного вторгнення.

Мінна загроза паралізувала роботу на великій кількості сільськогосподарських угідь України – близько 2 млн га залишаються незасіяними. Це призводить до колосальних економічних втрат: недоотримані доходи аграріїв, зменшення експорту сільгосппродукції, несплачені податки та втрата робочих місць в агросекторі. За оцінками експертів, українська економіка щороку втрачає 800 млн дол. США через неможливість використовувати ці землі [14].

Опис об'єкта дослідження. Для дослідження процесу виявлення ВМП і побудови карт забруднення ВМП було обрано територію Петропавлівської ОТГ Куп'янського району Харківської області (рис. 14).

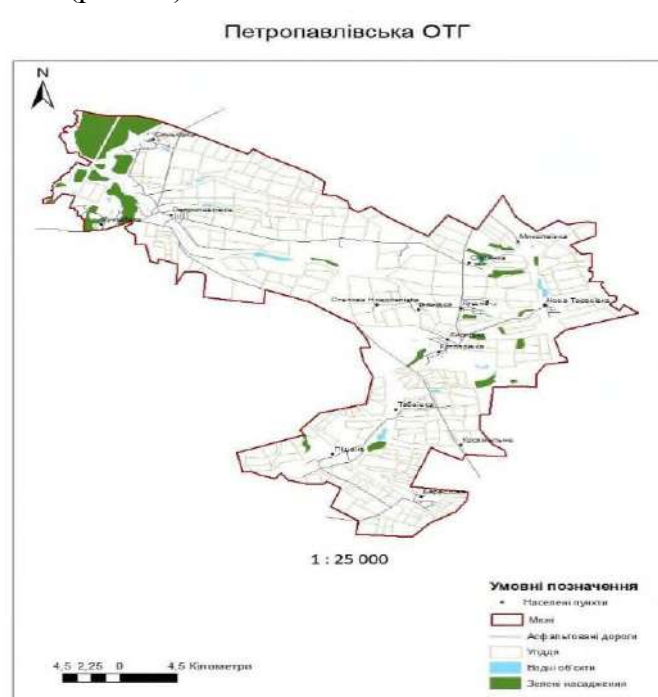


Рис. 14. Оцифрована територія Петропавлівської ОТГ

Джерело: розроблено авторами.

Вибір зумовлений тим, що Харківщина – це край, що чи не найбільше постраждав від російської окупації. І наразі продовжує страждати від її наслідків. Величезна територія краю нашіпигована мінами, у тому числі і протипіхотними, які заборонені міжнародними угодами.

Петропавлівська об'єднана територіальна громада розташована в Куп'янському районі Харківської області, а її адміністративним центром є село Петропавлівка. Громада має багату історію та унікальні природні особливості.

Петропавлівська сільська об'єднана територіальна громада була утворена 12 червня 2020 року шляхом об'єднання Петропавлівської, Кислівської, Піщанської та Ягідненської сільських рад. За результатами виборів, що відбулися 25 жовтня 2020 року, була сформована нова місцева влада громади.

Загальна площа громади складає 338,3 км², а чисельність населення станом на 2020 рік становила 4905 осіб. До складу громади входять 16 сіл: Петропавлівка, Берестове, Затишне, Іванівка, Кислівка, Котлярівка, Крохмальне, Кучерівка, Миколаївка, Нова Тарасівка, Орлянка, Піщане, Синьківка, Степова Новоселівка, Табаївка та Ягідне. Громада має значний природний потенціал. Її територією протікає річка Оскіл, що є важливим водним ресурсом для регіону.

Після деокупації Куп'янського району гуманітарне розмінування стало одним із першочергових завдань для спеціалістів вибухотехнічних підрозділів. За перші чотири місяці після звільнення території сапери повністю обстежили та очистили центральну частину Куп'янська. Основна увага була зосереджена на розмінуванні вулиць, об'єктів цивільної інфраструктури, газогонів та ліній електропередач, адже саме ці елементи мають критичне значення для життя та безпеки місцевих жителів. Усі знайдені вибухонебезпечні предмети або вивозили для подальшої утилізації, або знешкоджували безпосередньо на місці.

На території Харківської області з 23 січня піротехнічними підрозділами ДСНС було вилучено та знешкоджено 500 ВНП, і ця цифра продовжує зростати.

Процес гуманітарного розмінування в Куп'янському районі триває в умовах постійної небезпеки. Незважаючи на труднощі, вибухотехніки продовжують свою важливу роботу, рятуючи життя людей і відновлюючи безпечні умови для проживання та господарської діяльності на звільнених територіях.

Дуже багато жителів району загинуло та постраждало внаслідок вибухонебезпечних предметів, найбільше випадків виникало під час виконання сільськогосподарських робіт на полях.

Сільське господарство Харківщини стикається з серйозними викликами через мінну небезпеку, яка залишається актуальною навіть після деокупації територій. Незважаючи на активну роботу Державної служби з надзвичайних ситуацій, значні площі сільськогосподарських угідь залишаються непридатними для обробітки через загрозу вибухів. Особливо складна ситуація на півночі району, де триває процес розмінування, проте є ділянки, які поки що неможливо очистити через високу небезпеку. Крім мін, значна проблема – залишки від ракет та снарядів, що знаходяться на полях, які вже заросли бур'янами.

Через брак спеціалізованої техніки та кваліфікованих фахівців аграрії змушені шукати альтернативні способи розмінування, наприклад, старі трактори ХТЗ переобладнують у саморобні машини для очищення полів. Однак такі методи несуть ризики, оскільки техніка може вийти з ладу після наїзду на вибухонебезпечний предмет. Діяльність аграріїв значно ускладнюються відсутністю точних карт розмінування, адже вони є закритою інформацією у зв'язку з воєнним станом. Через це деякі господарства вдаються до послуг некваліфікованих спеціалістів, що підвищує ризики для працівників і техніки. Водночас ДСНС продовжує свою роботу, і в громадах Ізюмського району розмінування здійснюється спеціалізованою технікою з відповідними перевірками. Однак залишається багато ділянок, які поки що неможливо очистити.

Способи виявлення вибухонебезпечних предметів за допомогою БПЛА. Один із ключових аспектів дослідження полягає в аналізі просторового розташування вирв (рис. 15).



Рис. 15. Ідентифіковані вирви від мін. Розроблено на основі базової карти ArcGIS

Висока щільність таких об'єктів на обмеженій площі може свідчити про інтенсивне мінування або артилерійські обстріли. Використовуючи інструменти ArcGIS та інші геоінформаційні програми, можна визначати кластери вирв, які можуть вказувати на мінні поля, оцінювати ймовірність наявності нездетонованих боєприпасів на основі нерівномірного розподілу вибухів та будувати карти ризику для подальшого розмінування територій.

Даний метод використовується у військовій сфері для оцінки небезпеки на деокупованих територіях, у сільському господарстві для мінімізації ризиків під час обробки ґрунту, а також у гуманітарних місіях з розмінування. Використання БПЛА значно прискорює процес обстеження територій та зменшує ризики для саперів. Саме таким чином було розроблено картосхему Петропавлівської ОТГ із позначенням вирв від мін та небезпечних ділянок – рис. 16.

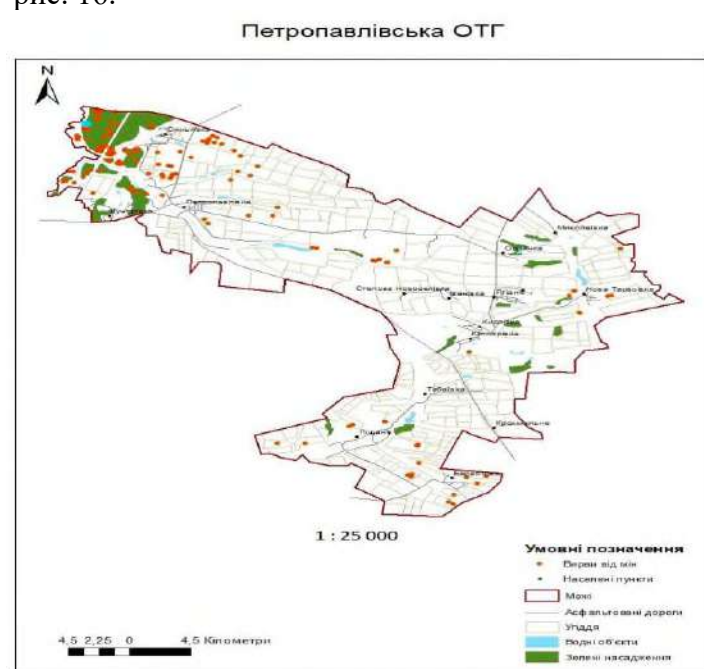


Рис. 16. Ідентифікація небезпечних зон. Власна розробка

БПЛА мають датчики та камери, завдяки яким за 1 годину він спроможний просканувати 1 га території.

Під час дослідження виявлено 144 небезпечні зони.

Наступним кроком було побудовано буферні зони навколо небезпечних зон у радіусі 500 м, оскільки саме така відстань від вибухонебезпечних предметів є безпечною для населення (рис. 17 та рис. 18).

Безпечна відстань у 500 метрів від ВНП визначається виходячи з радіуса ураження вибухової хвилі, розльоту осколків та можливості вторинних детонацій.



Рис. 17. Буферна зона 500 м навколо вибухонебезпечних предметів

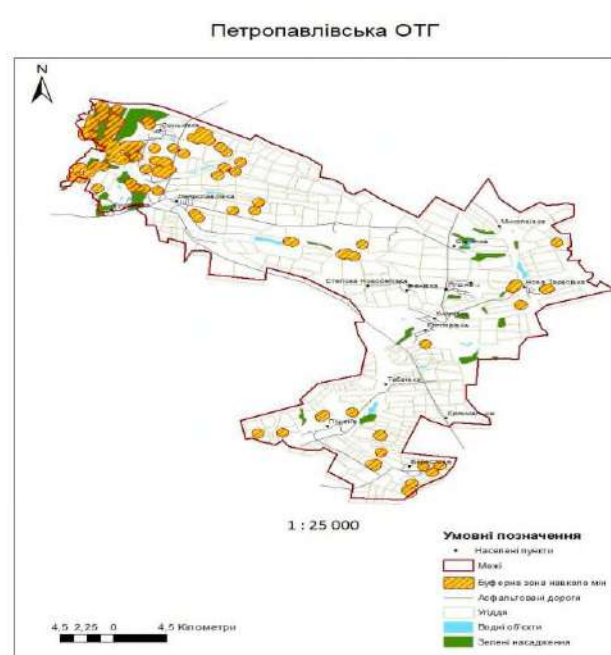


Рис. 18. Буферна зона 500 м навколо вибухонебезпечних предметів

Вибухові пристрої можуть мати різну потужність, але така відстань мінімізує ризик отримання смертельних поранень або пошкодження техніки. Крім того, вона дає змогу саперам безпечно проводити знешкодження або контрольовані підриви небезпечних предметів без загрози для цивільного населення.

ВНП становлять серйозну загрозу в різних ландшафтних умовах. На сільськогосподарських угіддях вони можуть детонувати під час польових робіт, завдаючи шкоди техніці, врожаю та, найголовніше, життю аграріїв. На водних об'єктах такі предмети можуть залишатися невидимими, створюючи небезпеку для рибалок, плавців та судноплавства. У лісах

міни та нерозірвані боєприпаси ускладнюють доступ до ресурсів, становлять загрозу для тварин і людей, які збирають гриби чи займаються лісовими роботами. На дорогах вони можуть призвести до трагічних наслідків для автомобілістів, автобусних перевезень і рятувальних служб, ускладнюючи логістику та роботу з відновлення інфраструктури.

Далі, за допомогою інструмента вибірки були визначені небезпечні для населення сільськогосподарські угіддя, ділянки автомобільних доріг, ареали зелених насаджень та водних об'єктів, що можуть нести мінну небезпеку (рис. 19).

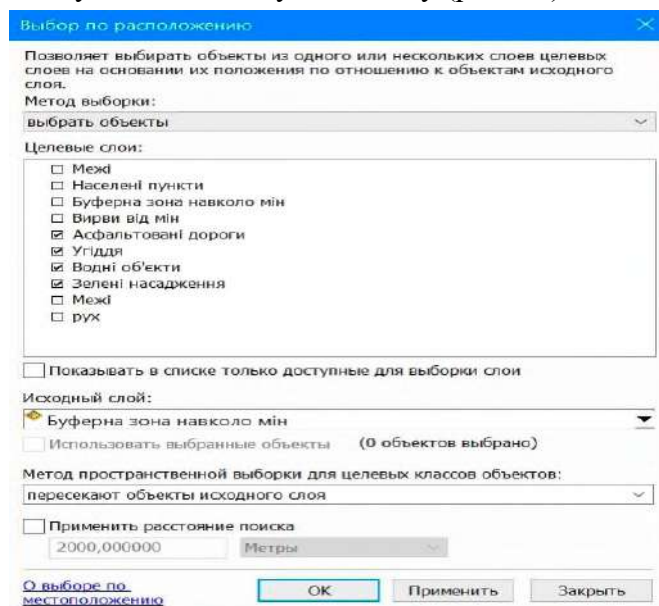


Рис. 19. Інструмент вибірки ArcGIS

Аналізуючи картосхему вибірки небезпечних територій Петропавлівської ОТГ (рис. 19), були визначені небезпечні ділянки, представлені в табл. 2.

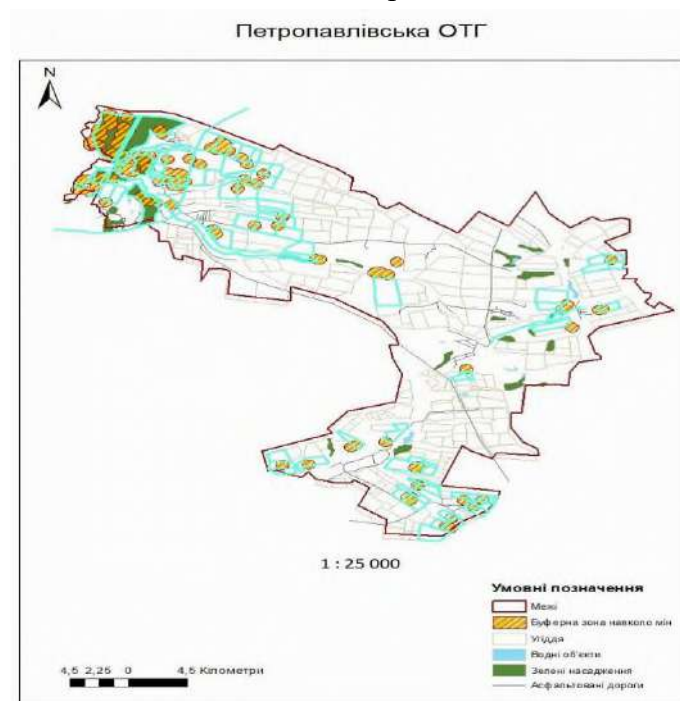


Рис. 19. Виборка небезпечних територій

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2 – Визначення кількості небезпечних ділянок

Кількість небезпечних ділянок ОТГ	
Сільськогосподарські угіддя	75
Дороги	9
Зелені насадження	9
Водні об'єкти	6

Висновки. Гуманітарне розмінування передбачає комплекс заходів з метою ліквідації небезпек, пов'язаних із вибухонебезпечними предметами, включаючи нетехнічне та технічне обстеження територій, складення карт, виявлення, знешкодження та (або) знищення вибухонебезпечних предметів, маркування, підготовку документації після розмінування, надання громадам інформації щодо протимінної діяльності та передачу очищеної території. Триваючий конфлікт високої інтенсивності зумовлює значну небезпеку та унікальність розмінування території України.

Гуманітарне розмінування в Україні є важливою складовою частиною державної політики у сфері цивільного захисту та національної безпеки. Процес очищення територій від вибухонебезпечних предметів потребує значних зусиль, координації між державними органами та міжнародною співпрацею. Від ефективності розмінування залежить не тільки безпека громадян, але й можливість відновлення економіки та життєдіяльності на деокупованих територіях. На сьогодні гуманітарне розмінування в Україні є не лише питанням національної безпеки, але й важливою частиною міжнародних зобов'язань, що мають сприяти відновленню миру та стабільності в країні.

Практика систематичного ретельного гуманітарного розмінування є необхідною передумовою сталого управління навколишнім природним середовищем у подальшому на пост конфліктних територіях, адже дозволить запобігти та мінімізувати деградацію ґрунтів, земельних ресурсів, біорізноманіття, забруднення цих компонентів, викиди забруднюючих речовин, які можуть навіть сприяти зміні клімату, а також сприяти збереженню природних ресурсів.

Існуюча практика використання магнітометрів разом з БПЛА для виявлення ВВП свідчить, що магнітометри не можуть виявити міни, зроблені з пластику, кераміки та інших неметалевих матеріалів. Проте, застосування технологій штучного інтелекту дозволяє позбутися цієї вади. А машинне навчання може взагалі покращити пошук мін та подолання перепон у цій роботі.

Незважаючи на те, що БПЛА не спроможні самостійно викопувати міни, однак просторові дані, отримані за їх допомогою та наступна побудова карт дозволяє суттєво прискорити роботу з гуманітарного розмінування.

Список використаних джерел

1. Коваль М. С. та ін. (2023). *Дії підрозділів ДСНС України в умовах воєнного стану*. ЛДУ БЖД.
2. Перга Т. Ю. (2022). Екологічні наслідки війни Росії проти України. <https://ivinas.gov.ua/viina-rf-proti-ukrainy/ekolohichni-naslidky-viiny-rosii-proti-ukrainy.html>.
3. Безпека і здоров'я на роботі у воєнний та післявоєнний час. Досвід України в умовах російської агресії (2023). https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@europe/@ro-geneva/@sro-budapest/documents/genericdocument/wcms_856143.pdf.
4. Розмінування українських територій. (б.д.). <https://zn.ua/ukr/war/rozminuvannja-ukrajinskikh-teritorij-jak-svit-dopomahaje-ukrajini.html>.
5. Humanitarian demining. (б.д.). <https://ua-energy.org/en/posts/28-01-2025-5aac62ba-1c5b-4567-8125-c00639a1ca71>.

6. Національна стратегія протимінної діяльності на період до 2033 року. (2024). <https://demine.gov.ua/static-objects/demine/uploads/public/66c73d9d9/66c73d9d9494f494441892.pdf>.
7. Міністерство оборони України. (2024). *Площа територій України, потенційно забруднених мінами та ВВП, зменшилась на 17000 км² у 2024 році*. <https://mod.gov.ua/news/ploshha-teritorij-ukrayini-potenczijno-zabrudnenih-minami-ta-vibuhonebezpechnimi-predmetami-zmenshilas-na-17-000-km-u-2024-rocz>.
8. Ментус, І.Е., Ясько, В.А., Саприкін, Є.Ю. (2024). Методи виявлення мін для гуманітарного розмінування: огляд. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 11(3), 22–28.
9. *Український дрон*. (б.д.). <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/2851546-ukrainskij-dron-zdatnij-viavlati-mini-z-tocnistu-do-santimetra-armiainform.html>.
10. Моїсєєв, В. (2023). До 30% території України забруднено вибухонебезпечними предметами: що допоможе їх прибрати. *Економіка України*.
11. Taranova, E. (2022, 22 червня). Як за допомогою технологій на основі штучного інтелекту Україна планує розмінувати території. *Delo.ua*. <https://delo.ua/ru/technologies/kak-s-pomoshhyu-technologii-na-baze-iskusstvennogo-intellekta-ukraina-planiruet-razminirovat-territorii-399802>.
12. Попов, М.О., Станкевич, С.А., Мосов, С.П., Титаренко, О.В., Дугін, С.С., Голубов, С.І., & Андреев, А.А. (2021). Технологія автоматизованого виявлення мін за результатами комплексування багатоспектральної та інфрачервоної зйомки з безпілотних літальних апаратів. У *Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи* : матеріали IV науково-практичної конференції (9–10 вересня 2021 р.) (с. 13–15). Національний центр управління та випробувань космічних засобів.
13. *Сервіс протимінної діяльності ДСНС*. (2023). <https://mine.dsns.gov.ua>.
14. *Скільки Україна втрачає на замінованих полях?* (2024). <https://epravda.com.ua/columns/2024/09/19/719540>.

References

1. Koval, M.S. et al. (2023). *Dii pidrozdiliv DSNS Ukrainy v umovakh voiennoho stanu [Actions of the 1 units of Ukraine under martial law]*. Lviv LDU BZhD.
2. Perha, T.Iu. (2022). *Ekolohichni naslidky viiny Rosii proty Ukrainy [Environmental consequences of Russia's war against Ukraine]*. <https://ivinas.gov.ua/viina-rf-proti-ukrainy/ekolohichni-naslidky-viiny-rosii-proti-ukrainy.html>.
3. *Bezpeka i zdorovia na roboti u voiennyi ta pisliavoiennyi chas. Dosvid Ukrainy v umovakh rosiiskoi ahresii [Occupational safety and health in wartime and post-war times. Experience of Ukraine in the conditions of Russian aggression]*. (2023). https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@europe/@ro-geneva/@sro-budapest/documents/genericdocument/wcms_856143.pdf.
4. Moskalenko, Y. (2023). *Rozminuvannia ukrainskyi terytorii [Demining of Ukrainian territories]*. <https://zn.ua/ukr/war/rozminuvannja-ukrajinskikh-teritorij-jak-svit-dopomahaje-ukrajini.html>.
5. *Humanitarian demining*. (n.d.). <https://ua-energy.org/en/posts/28-01-2025-5aac62ba-1c5b-4567-8125-c00639a1ca71>.
6. *Natsionalna stratehiia protyminnoi diialnosti na period do 2033 roku [National mine action strategy for the period up to 2033]*. (2024). <https://demine.gov.ua/static-objects/demine/uploads/public/66c73d9d9/66c73d9d9494f494441892.pdf>.
7. *Ploshcha terytorii Ukrainy, potentsiino zabrudnenykh minamy ta VNP, zmenshylyas na 17000 km² u 2024 rotsi [The area of Ukrainian territory potentially contaminated with mines and UXO decreased by 17,000 km² in 2024]*. (n.d.). <https://mod.gov.ua/news/ploshha-teritorij-ukrayini-potenczijno-zabrudnenih-minami-ta-vibuhonebezpechnimi-predmetami-zmenshilas-na-17-000-km-u-2024-rocz>.
8. Mentus, I.E., Yasko, V.A., & Saprykin, Ye.Iu. (2024). Metody vyivlennia min dlia humanitar-noho rozminuvannia: ohliad [Methods of mine detection for humanitarian demining: a review]. *Ukrainskyi zhurnal dystantsiinoho zonduvannia zemli – Ukrainian journal of remote sensing*, 11(3), 22–28.
9. *Ukrinform*. (2020). *Ukrainskyi dron [Ukrainian drone]*. <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/2851546-ukrainskij-dron-zdatnij-viavlati-mini-z-tocnistu-do-santimetra-armiainform.html>.
10. Moiseev, V. (2023). Up to 30% of Ukraine's territory is contaminated with explosive ordnance: what will help clean it up. *Economy of Ukraine*.

11. Taranova, E. (2022, 22 June). Yak za dopomohoiu tekhnolohii na osnovi shtuchnoho intelektu Ukraina planuie rozminuvaty terytorii [How Ukraine plans to demine territories using artificial intelligence technologies]. *Delo.ua*. <https://delo.ua/ru/technologies/kak-s-pomoshhyu-texnologii-na-baze-is-kusstvennogo-intellekta-ukraina-planiruet-razminirot-territorii-399802>.

12. Popov, M.O. (2022). *Tekhnolohiia dystantsiinoho vyivlennia min na osnovi analizu materialiv ziomky z bezpilotnykh litalnykh aparativ: stan i perspektyvy. Stenohrama dopovidi na zasidanni Prezydii HAH Ukrainy 6 kvitnia 2022 roku [Technology of remote mine detection based on the analysis of UAV imagery: state and prospects. Transcript of the report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine on April 6, 2022]*.

13. Servis protymynnoi diialnosti DSNS [Mine action service of the SES]. (2023). <https://mine.dsns.gov.ua>.

14. Skilky Ukraina vtrachaie na zaminovanykh poliakh? [How much does Ukraine lose on mined fields?]. (2024). *Ekonomichna pravda – Economic truth*. <https://epravda.com.ua/columns/2024/09/19/719540>.

Отримано 20.03.2025

UDC 351.86

Vitalii Zatserkovnyi¹, Igor Nikoliuk²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Geoinformatics

Taras Shevchenko National University of Kyiv, SRI "Institute of Geology" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com ORCID <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125> ScopusID: 57200165109

²1st year postgraduate student, specialty 193 – Geodesy and land management

Taras Shevchenko National University of Kyiv, SRI "Institute of Geology" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: nikoliuk.igor@gmail.com ORCID <https://orcid.org/0009-0006-0750-2603> Researcher ID: rid105343

USING UAVS TO DETECT EXPLOSIVES AND CREATE MAPS IN HUMANITARIAN DEMINING

Russia's full-scale invasion has led to unprecedented contamination of Ukrainian territory with unexploded ordnance (UXO), making it one of the most mine-affected countries globally (approx. 144,000 sq km potentially hazardous). This poses a long-term lethal threat to civilians, hinders socio-economic recovery (especially in the agricultural sector), damages infrastructure, and harms the environment.

Humanitarian demining is identified as a critically important process to eliminate these threats. It includes non-technical and technical surveys, mapping, marking, neutralization of UXO, and risk education for the population. The article emphasizes relevance of applying modern technologies to optimize this complex and dangerous process.

Unmanned aerial vehicles (UAVs) play the key role in modernizing demining efforts. They enable remote surveys of large areas with minimal risk to personnel. The article details methods of using UAVs: equipping them with magnetometers to detect metallic objects, infrared (thermal) sensors to capture temperature anomalies from UXO, and multispectral/hyperspectral cameras to analyze changes in vegetation or detect specific materials. Ground-penetrating radar (GPR) and LiDAR are also mentioned.

A crucial aspect is the integration of UAV data with geographic information systems (GIS) and artificial intelligence (AI) algorithms. This allows for the creation of detailed orthophotomaps, digital terrain models, automated image analysis, identification of potential threats, and construction of accurate risk maps. The study of the Petropavlivka OTHG territory is presented as an example, where UAVs and ArcGIS were used to identify explosion craters, define hazardous zones, and create 500-meter safety buffer zones.

Despite certain challenges (e.g., detecting non-metallic mines), UAV technologies demonstrate high efficiency and hold immense potential for significantly accelerating the process of clearing Ukrainian land, saving lives, and facilitating post-war recovery.

Keywords: *unmanned aerial vehicles (UAVs); unexploded ordnance (UXO); humanitarian demining; UXO detection; geographic information systems (GIS); sensors; remote sensing.*

Fig.: 19. Table: 2. References.: 25.

Олег Олегович Горюн

доктор філософії, асистент кафедри інженерних систем у будівництві

Вінницький національний технічний університет (Вінниця, Україна)

E-mail: oleggoriun@vntu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5678-835X>**ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПРОСОЧУВАЛЬНИХ РІДИН У ПРОЦЕСІ ІМПУЛЬСНОГО ІМПРЕГНУВАННЯ БЕТОНУ**

У статті досліджено особливості розповсюдження просочувальних рідин у процесі імпульсного імпрегнування бетону. Проаналізовано вплив імпульсного тиску на проникнення рідини в капілярно-пористу структуру бетону. Встановлено залежність між втратами тиску, капілярним тиском та ударним (імпульсним) тиском просочувальної рідини. Визначено переваги імпульсного методу порівняно зі статичним імпрегнуванням. Отримані результати можуть бути використані для покращення технологій імпрегнування бетону, побудови математичної моделі імпульсного імпрегнування бетону з врахуванням впливу частоти повторювання імпульсів тиску рідини.

Ключові слова: бетон; капілярно-пориста структура; імпрегнування; просочування; математична модель; імпульси тиску рідини; рух рідини в пористому тілі; будівельні матеріали та вироби; модифікація бетону.

Рис.: 3. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Імпрегнування бетону просочувальними рідинами є ефективним методом підвищення його довговічності, водостійкості та хімічної стійкості. Особливо актуальним є вдосконалення технологій імпрегнування, оскільки традиційні методи, пов'язані із застосуванням тиску, зануренні або нанесенні просочувальних складів на поверхню бетону, часто не забезпечують достатньої глибини проникнення просочувальних складів. Одним із перспективних напрямів є використання імпульсного імпрегнування, яке базується на застосуванні імпульсів тиску для покращення розповсюдження просочувальної рідини в капілярно-пористій структурі бетону. Однак процес розповсюдження просочувальних рідин у бетоні за таких умов досліджений недостатньо, що ускладнює оптимізацію технологічних параметрів та розробку ефективних моделей для прогнозування процесу. Дослідження механізмів проникнення рідин у бетон під дією імпульсного тиску дозволить розширити сферу застосування цього способу в будівництві та підвищити якість будівельних виробів.

Постановка проблеми. У дослідженні виявлено особливості поширення просочувальних рідин у бетоні у процесі імпульсного імпрегнування, визначено фактори, що впливають на ефективність імпрегнування, та окреслено шляхи оптимізації цього процесу. Знання про закономірності розповсюдження рідини в капілярно-пористій структурі (КПС) бетону відкривають можливість моделювання процесів імпрегнування та прогнозування результатів обробки матеріалів залежно від обраних технологічних параметрів імпрегнування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема проникнення просочувальних рідин у бетон та покращення його експлуатаційних характеристик шляхом імпрегнування є предметом численних досліджень. У роботах [1-3] досліджували будову КПС бетону, розміри та розподіл пор, а також їхній вплив на процеси фільтрації та просочування рідин. Наукові праці [4; 5] присвячені опису процесів, що виникають під час ультразвукового імпрегнування, що може супроводжуватися кавітаційними явищами, які підвищують ефективність обробки бетону. У роботах [6-8] було досліджено механізм капілярного просочування і технологію вакуумного імпрегнування, яка покращує проникнення складу в товщу бетонів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри наявні дослідження, що стосуються розповсюдження рідин у капілярно-пористій структурі бетону та методів імпрегнування, залишаються проблеми, які не отримали вичерпного наукового обґрунтування. Зокрема, недостатньо досліджено зв'язок між втратами тиску в капілярі, капілярним тиском і ударним тиском, який зумовлений імпульсами рідини.

Мета дослідження. Визначення особливостей розповсюдження просочувальних рідин у бетоні під впливом імпульсного імпрегнування, встановлення основних закономірностей процесу, зокрема, зв'язок між втратами тиску в капілярі, капілярним і ударним (імпульсним) тиском для обґрунтування ефективності використання імпульсного методу обробки бетону.

Виклад основного матеріалу. Ключовими параметрами, які характеризують процес імпрегнування будівельних матеріалів є тривалість процесу, яку визначає швидкість імпрегнування, глибина заповнення КПС або зміна об'єму просочувальної рідини в порах бетону (залежно від їхньої геометричної будови, методу імпрегнування, а також властивостей просочувальної рідини). На процес імпрегнування бетону, як капілярно-пористого тіла, впливає сукупність перебігу таких фізичних явищ [9]: рух просочувальної рідини в бетоні під дією капілярного тиску; рух просочувальної рідини в бетоні внаслідок виникнення різниці тисків у попередньо вакуумованому пористому просторі зумовлений дією прикладеного надлишкового тиску; дифузійне переміщення молекул та іонів просочувальної рідини у КПС бетону. Вказаний надлишковий тиск є сумою двох складових рідинного тиску: статичної складової та імпульсної складової тиску. Переміщення рідини у КПС у процесі імпрегнування із застосуванням надлишкового тиску, що відбувається під час реалізації способу вакуум-тиск-вакуум [10; 11], включає лише статичну складову, оскільки імпульси тиску рідини відсутні. Водночас рух просочувальної рідини в КПС бетону під час імпульсного імпрегнування [12; 13] виникає внаслідок поєднання статичної складової з імпульсною (пульсуючою, ударною) складовою рідинного тиску.

Просочувальна рідина заповнює КПС зразка, зануреного в неї, під дією капілярних сил всмоктування та під дію тиску рідинного середовища, таким чином:

$$\Delta p = p_p + p_k - p_{втр}, \quad (1)$$

де Δp – різниця тисків, що зумовлює переміщення рідини;

p_p – тиск рідинного середовища;

p_k – капілярний тиск;

$p_{втр}$ – втрати тиску в КПС матеріалу.

Відомо, що капілярний тиск виникає під впливом сил поверхневого натягу

$$p_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}, \quad (2)$$

де σ – сила поверхневого натягу;

θ – крайовий кут змочування;

r – радіус капіляра.

Рівняння (2) демонструє важливість вибору типу просочувальної рідини за критерієм в'язкості, оскільки рідини з низькою в'язкістю характеризуються меншим кутом змочування, що призводить до зростання капілярного тиску.

Дифузійне імпрегнування пояснюється проникненням молекул чи іонів солі з просочувального розчину, які дифундують у рідину, що міститься в товщі бетону. Дифузія відбувається внаслідок різниці концентрацій складових просочувального розчину та складових, розчинених у рідині, яка міститься в КПС зразка. Механізм дифузійного імпрегнування описується першим законом Фіка:

$$j = -D \frac{dC}{dx}, \quad (3)$$

де j – дифузійний потік;

D – коефіцієнт дифузії;

$\frac{dC}{dx}$ – градієнт концентрації.

Імпульсний спосіб імпрегнування [12; 13], передбачає циклічну зміну величини надлишкового тиску, тобто ударні пульсації тиску рідини із заданою періодичністю (частою пульсацій або частотою імпульсів). За таких умов більш доцільним буде використання терміну «ударного» або «імпульсного» тиску на зміну «надлишковому».

При моделюванні процесу проникнення рідини внаслідок імпрегнування із застосуванням імпульсів тиску виникає потреба враховувати зміну складових в'язкості просочувального складу [9]. У такому випадку може застосовуватись поняття вібраційної в'язкості, тобто ефективної в'язкості рідини під дією коливань або імпульсів тиску, яка значно впливає на проникність рідини у КПС бетону. Ця властивість може змінюватися залежно від режиму нагнітання рідини в об'єм тіла бетону. Імпульсний режим передбачає періодичну зміну тиску, що може тимчасово знижувати в'язкість просочувальної рідини. Зниження в'язкості сприяє глибшому та рівномірнішому проникненню рідини в пористу структуру бетону. Частота імпульсів має вплив на динаміку руху просочувальної рідини. Застосування більших значень частоти може призводити до зниження вібраційної в'язкості завдяки ефекту вібраційного розрідження. Це сприяє збільшенню проникності просочувального складу і дозволяє ефективніше долати гідравлічний опір тіла бетону. Амплітуда тиску також має вплив на проникність просочувальної рідини. При вищій амплітуді в'язкість рідини в системі може значно знижуватись, що сприяє глибшому проникненню просочувальної рідини в бетон.

Для опису процесу імпрегнування рідини у КПС можна використовувати фільтраційні рівняння, однак виникають складнощі при визначенні коефіцієнта фільтрації для різних типів бетонів, що значно обмежує застосування фільтраційних рівнянь для практичних розрахунків у контексті просочування бетонів.

Мікроструктура бетону є досить складною і передбачає наявність пор, капілярів та інших пустот. Моделювання процесу імпрегнування бетону ускладнюється й тим, що даний матеріал відзначається неоднорідністю своїх геометричних характеристик. Крім широкого діапазону розмірів, пори мають також різну геометричну форму. При цьому капілярна система матеріалу включає можливість сполучення пор бетонного зразка через численні капілярні канали (рис. 1).

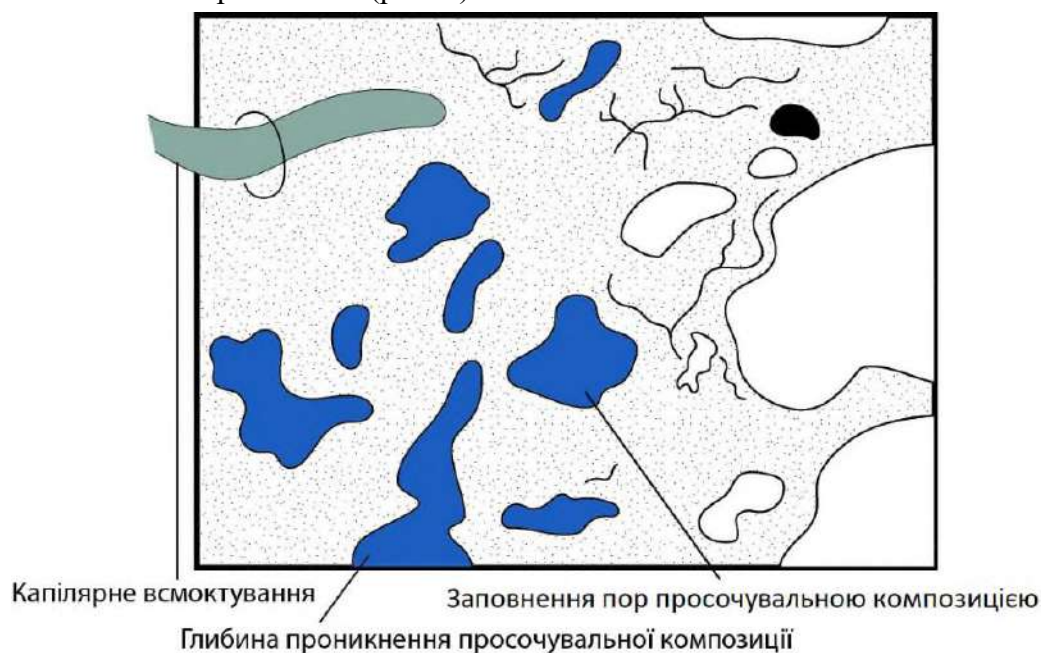


Рис. 1. Проникнення просочувальної рідини в КПС бетону

Джерело: розроблено автором.

Для моделювання проникнення просочувальної рідини в КПС за геометричну модель пори бетонного зразка було обрано сферичну фігуру, в той час як циліндрична фігура відповідає моделі капіляра (рис. 2).

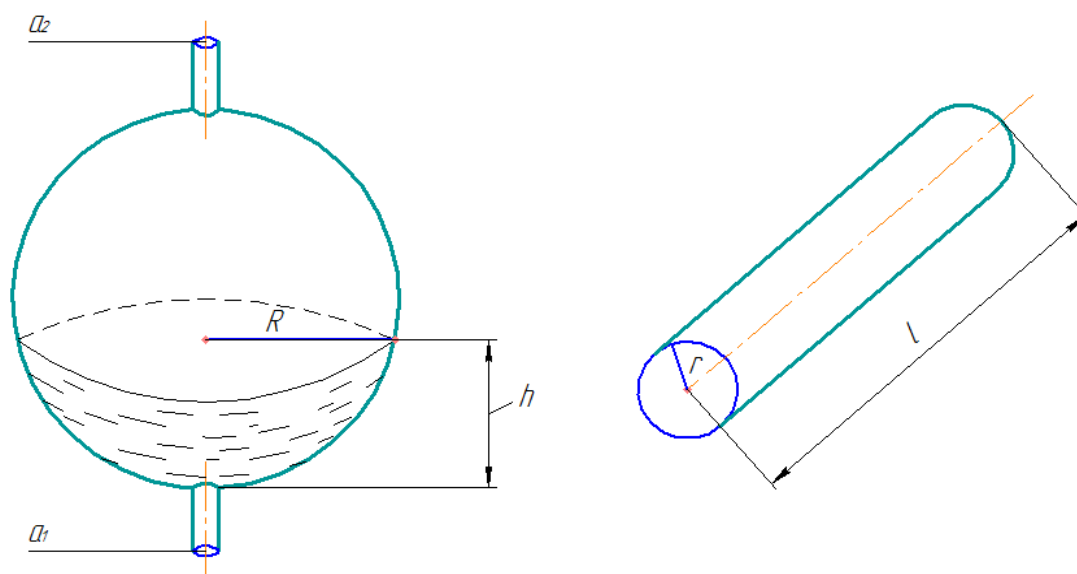


Рис. 2. Схематичне зображення геометричних моделей пори та капіляра
Джерело: розроблено автором.

Ефективність імпрегнування часто визначається глибиною проникнення та розподіленням просочувальної рідини в об'ємі бетону. У випадку, якщо модель пори бетонного тіла матиме площу перерізу $S = S(h)$, тоді h — рівень проникнення рідини у сферичну пору або іншими словами глибина проникнення просочувального складу. З огляду на капілярну систему, яка сполучає, передбачаємо наявність входного та вихідного отвору в порі, що слугуватиме для входу і виходу просочувальної рідини, а також уособлюють у собі всі можливі капілярні під'єднання до пори. Причому площі даних отворів a_1 і a_2 відповідно.

Заповнення пори просочувальною рідиною передбачає зміну об'єму цієї рідини протягом тривалості імпрегнування Δt . Для опису цього процесу використаємо залежність

$$\Delta V = (a_1 v_1 - a_2 v_2) \cdot \Delta t, \quad (4)$$

де ΔV — зміна об'єму рідини в порі;

a_1, a_2 — площі входного та вихідного отвору в порі;

v_1 — швидкість переміщення рідини у входному каналі;

v_2 — швидкість переміщення рідини у вихідному каналі.

Зміну об'єму рідини у сферичній порі:

$$\Delta V = \pi \Delta h^2 \cdot \left(R - \frac{1}{3} \Delta h\right), \quad (5)$$

де Δh — зміна рівня довжини (глибини) проникнення рідини в порі;

R — радіус пори.

Враховуючи залежності (4) і (5), отримаємо рівняння, що описує зміну об'єму рідини в порі з врахуванням швидкостей переміщення рідини на входному та вихідному каналі протягом деякої тривалості імпрегнування

$$\pi \Delta h^2 \cdot \left(R - \frac{1}{3} \Delta h\right) = (a_1 v_1 - a_2 v_2) \cdot \Delta t. \quad (6)$$

Швидкості руху на вході та виході з капіляра

$$v_{1,2} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{1,2}}{\rho}}, \quad (7)$$

де $\Delta p_{1,2}$ – різниця тисків або повний тиск на вході та виході з капіляра (або у вхідному та вихідному капілярах) відповідно;

ρ – густина просочувального складу.

Імпульсне імпрегнування бетону передбачає створення додаткового динамічного (імпульсного) тиску, який накладається на стаціонарний надлишковий тиск просочувальної рідини. Спрощений графік коливань імпульсів тиску просочувальної композиції за синусоїдальним законом протягом періоду часу (рис. 3).

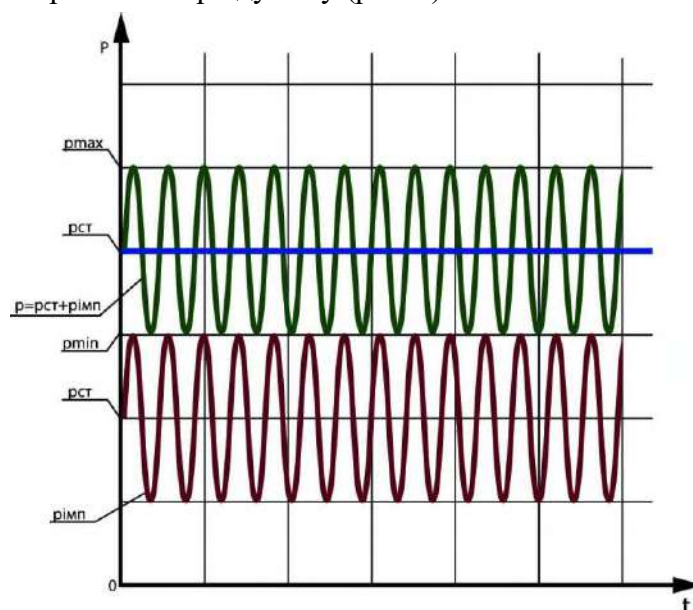


Рис. 3. Графік залежності тиску рідини від тривалості імпрегнування
Джерело: розроблено автором.

У такому випадку повний тиск просочувальної рідини визначатися рівнянням

$$P_p = P_{имп} + P_{ст}, \quad (8)$$

де $P_{имп}$ – імпульсна складова імпульсів тиску просочувальної рідини;

$P_{ст}$ – статичний надлишковий тиск просочувальної рідини.

Тиск у капілярі за використання гідроімпульсного пристрою для генерування гармонічних коливань, для яких величина імпульсного тиску буде змінюватись за синусоїдальним законом протягом інтервалу часу t , описується такою залежністю

$$P_{имп}(t) = P_{max} \cdot \sin(2\pi\omega t + \psi), \quad (9)$$

де P_{max} – амплітуда тиску в при застосуванні імпульсів тиску рідини;

ω – частота зміни тиску за період часу;

t – тривалість імпульсів тиску рідини;

ψ – початкова фаза.

З урахуванням залежності (1), отримаємо рівняння для визначення різниці тисків, яка зумовлює заповнення пористої структури бетонного зразка

$$\Delta p = p_k + p_{imn} + p_{cm} - p_{vmp}, \quad (10)$$

де p_{vmp} – втрати тиску в капілярі.

Відповідно до рівнянь (1) та (10), для пори з одним отвором для підведення капілярного каналу отримаємо:

$$\Delta p = p_k + p_{imn} + p_{cm} - p_{vmp} - p_n, \quad (11)$$

де p_n – тиск повітря (та залишків води), затиснутого всередині пори.

Виходячи із залежностей (9), (10) та (11), отримуємо рівняння, які описують різницю тисків, внаслідок застосування імпульсної зміни тиску за синусоїдальним законом, що зумовлює рух просочувальної в структурі бетону. Рівняння для розімкнутої пори або капіляра матиме вигляд:

$$\Delta p = p_k + p_{\max} \cdot \sin(2\pi\omega t + \psi) + p_{cm} - p_{vmp}. \quad (12)$$

Рівняння для замкненої пори

$$\Delta p = p_k + p_{\max} \cdot \sin(2\pi\omega t + \psi) + p_{cm} - p_{vmp} - p_n. \quad (13)$$

Статична складова тиску просочувальної рідини визначатиметься рівнянням

$$p_{cm} = 0,5(p_{\max} + p_{\min}) \quad (14)$$

Підставляючи (14) в (13) та (12), а також нехтуючи тиском капілярного всмоктування через його малу величину відносно повного надлишкового тиску рідини, отримаємо рівняння різниці тисків для розімкнутої пори або капіляра

$$\Delta p = p_{\max}(\sin(2\pi\omega t + \psi) + 0,5) + 0,5p_{\min} - p_{vmp}. \quad (15)$$

Для замкненої пори

$$\Delta p = p_{\max}(\sin(2\pi\omega t + \psi) + 0,5) + 0,5p_{\min} - p_{vmp} - p_n. \quad (16)$$

Знаючи радіус капіляра r , можна розрахувати довжину (глибину) проникнення просочувального складу у капіляр, враховуючи (2):

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}, \quad (17)$$

де h – відстань на яку проникає просочувальна рідина по довжині капіляру.

Втрати тиску в капілярі визначаються параметрами швидкості та характером руху просочувального складу. Для розрахунку втрат тиску, що виникають унаслідок тертя під час переміщення рідини по довжині капіляра l , можна використовувати формулу Дарсі-Вейсбаха

$$p_{vmp} = \lambda \frac{\rho v^2}{4r}, \quad (18)$$

де ρ – густина просочувального складу;

v – швидкість руху просочувального складу в капілярі або порі;

λ – коефіцієнт гідравлічного тертя, який визначається режимом руху просочувального складу, геометричної будови стінок пор і капілярів, які характеризуються шорсткістю k_e , і визначається формулою Альтшуля.

$$\lambda = 0,11\left(\frac{k_e}{2r} + \frac{68}{Re}\right)^{0,25}, \quad (19)$$

де Re – число Рейнольдса, яке враховує режим руху рідини в капілярі або порі.

Встановлені закономірності дають можливість визначити основні технологічні параметри процесу імпрегнування бетонних зразків.

Висновки. Найбільш важливими показниками процесу імпульсного імпрегнування бетону є глибина проникнення просочувальної рідини, рівномірність її розповсюдження у капілярно-пористій структурі, швидкість руху просочувального складу.

Врахування геометричної будови пори, що представлена моделлю у вигляді сферичної фігури, а також розмірів капілярів КПТ дозволяє встановити їхній зв'язок зі швидкістю руху просочувальної рідини, який відбувається під дією надлишкового статичного та імпульсного тиску. Отримані рівняння (12) і (13) для капіляра (розімкненої пори), а також для замкненої пори із затиснутим залишковим повітрям всередині відображають перепад тиску, спричинений застосуванням імпульсів тиску за прийнятим синусоїдальним законом, що зумовлює рух просочувальної композиції в структурі бетону. Встановлений зв'язок між перепадом тиску, втратою тиску в капілярах та імпульсним впливом тиску рідини дає змогу прогнозувати поведінку різних просочувальних композицій, що дозволяє адаптувати технологію імпрегнування та підвищити її ефективність для бетонів із різною щільністю і пористістю.

Потребують подальшого детального дослідження процеси, що виникають у капілярно-пористій структурі бетонів при імпульсному імпрегнуванні залежно від зміни частоти повторювання імпульсів тиску. Крім того, перспективним є дослідження впливу вібраційної в'язкості на зменшення сил гідравлічного опору тіла бетону під час імпульсного імпрегнування.

Список використаних джерел

1. Guan, D., Pan, T., Guo, R., Wei, Y., Qi, R., Fu, C., Zhang, Z., & Zhu, Y. (2024). Fractal and Multifractal Analysis of Microscopic Pore Structure of UHPC Matrix Modified with Nano Silica. *Fractal and Fractional*, 8(6), 360. <https://doi.org/10.3390/fractalfract8060360>.
2. Mehta, P.K. and Monteiro, P.J. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. <https://doi.org/10.1036/0071462899>.
3. Панасюк, В. А., Вировой, В. М., Сільченко, С. В. (2011). Аналіз зміни властивостей мікроструктури бетону у часі. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, 22, 120-124.
4. Вітковський, Ю. А. (2012). Відновлення бетону методом поверхневого просочування полімерними композиціями із застосуванням ультразвукових коливань. *Будівельні матеріали, виробництва та санітарна техніка*, 43, 181-184.
5. Колосов, О. Є., Сівецький, В. І., Панов, Є. М., Мікульонок, І. О. (2012) Математичне моделювання базових процесів виготовлення полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвукової модифікації. *ВД «Едельвейс»*, 268.
6. Сопов, В. П., Казімагомедов, І. Е., Наливайко, Т. Т. (2019). Інтенсифікація процесу просочення фібробетонних облицювальних виробів. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*, 48, 55-60.
7. Shumakov, I., Miroshnikov, V., Younis, B., Buhaievskiy, S., Bratishko, S. (2024). Improvement of concrete parameters by the method of Sodium Silicates impregnation by internal vacuum tamping. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012031>.
8. Balakrishna, M. N. (2017). Fundamental characterisation of impregnation on concrete structures [Doctoral dissertation, Nottingham Trent University]. Nottingham Trent University. <https://irep.ntu.ac.uk/id/eprint/33238/1/Balakrishna%20Muniswamappa%20Thesis.pdf>.
9. Коц І. В., Горюн О. О. (2019). Математичне моделювання процесів насичення бетонних зразків під дією гідроімпульсного навантаження. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 27(2), 123–129. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-123-129>.

10. Перетятко, Б. М. (2019). Технологічні схеми автоклавного просочення. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Теорія і практика будівництва*, 912, 139-145.
11. Sidhu J., Kumar P. (2023). Comprehensive review on hydrophobic modification of concrete: progress and perspectives. *Advances in Civil and Architectural Engineering*, 14(26), 155-180. <https://doi.org/10.13167/2023.26.10>.
12. Коц, І. В., Горюн, О. О. (2020). Спосіб виготовлення бетонополімерних виробів: (Патент України на корисну модель № 142720). Державна служба інтелектуальної власності України.
13. Горюн, О. О. (2024). Гідрофобізація будівельних виробів з використанням устаткування для циклічного гідротермічного насичення. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 36(1), 58–63. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-58-63>

References

1. Guan, D., Pan, T., Guo, R., Wei, Y., Qi, R., Fu, C., Zhang, Z., & Zhu, Y. (2024). Fractal and Multifractal Analysis of Microscopic Pore Structure of UHPC Matrix Modified with Nano Silica. *Fractal and Fractional*, 8(6), 360.
2. Mehta, P.K. and Monteiro, P.J. (2014) Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. <https://doi.org/10.1036/0071462899>.
3. Panasiuk V. A., Vyrovoy V.M., Silchenko S. V. (2011). Analiz zminy vlastyvoستي mikrostruktury betonu u chasi. [Analysis of changes in concrete microstructure properties over time.] *Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy - Resource-efficient materials, structures, buildings and facilities*, 22, 120-124.
4. Vitkovskiy Yu. A. (2012). Vidnovlennia betonu metodom poverkhnevoho prosochuvannia polimernymy kompozytsiiamy iz zastosuvanniam ultrazvukovykh kolyvan.[Concrete restoration by surface impregnation with polymeric compositions using ultrasonic vibrations.] *Budivelni materialy, vyroby ta sanitarna tekhnika - Construction materials, products and sanitary equipment*, 43, 181-184.
5. Kolosov, O.Ie., Sivetskyi, V.I., Panov, Ye.M., Mikulonok, I.O. (2012). Matematychnе modeliuвання bazovykh protsesiv vyhotovlennia polimernykh kompozytsiinykh materialiv iz zastosuvanniam ultrazvukovoi modyfikatsii [Mathematical modelling of the basic processes of manufacturing polymer composite materials using ultrasonic modification]. *VD «Edelveis» – VD “Edelveis”*, 268.
6. Sopov, V.P., Kazimahomedov, I.E., Nalyvaiko, T.T. (2019). Intensyfikatsiia protsesu prosochennia fibrobetonnykh oblytsiuvalnykh vyrobiv. [Intensification of the impregnation process of fibre-reinforced concrete facing products]. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*, 48, 55-60.
7. Shumakov, I., Miroshnikov, V., Younis, B., Buhaiievskiy, S., Bratishko, S. (2024). Improvement of concrete parameters by the method of Sodium Silicates impregnation by internal vacuum tamping. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012031>.
8. Balakrishna, M.N. (2017). Fundamental characterisation of impregnation on concrete structures [Doctoral dissertation, Nottingham Trent University]. Nottingham Trent University. <https://irep.ntu.ac.uk/id/eprint/33238/1/Balakrishna%20Muniswamappa%20Thesis.pdf>.
9. Kots, I.V., Horiun, O.O. (2019). Matematychnе modeliuвання protsesiv nasychennia betonnykh zrazkiv pid diieiu hidroimpulsnoho navantazhennia [Mathematical modelling of saturation processes of concrete specimens under the action of hydraulic pulse loading]. *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktсии v budivnytstvi – Modern technologies, materials and structures in construction*, 27(2), 123–129. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-2-123-129>.
10. Peretiatko B. M. (2019). Tekhnolohichni skhemy avtoklavnoho prosochennia [Technological schemes of autoclave impregnation]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politekhnika. Teoriia i praktyka budivnytstva – Journal of the National University “Lviv Polytechnic”. Theory and practice of construction*, 912, 139-145.
11. Sidhu, J., Kumar, P. (2023). Comprehensive review on hydrophobic modification of concrete: progress and perspectives. *Advances in Civil and Architectural Engineering*, 14(26), 155-180. <https://doi.org/10.13167/2023.26.10>.
12. Kots I. V., Horiun O. O. (2020). Sposib vyhotovlennia betonopolimernykh vyrobiv: (Patent Ukrainy na korysnu model № 142720). Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy [Method for manufacturing concrete polymer products: (Utility model patent of Ukraine No. 142720). State Intellectual Property Service of Ukraine].

13. Horiun, O.O. (2024). Hidrofobizatsiia budivelnykh vyrobiv z vykorystanniam ustatkuvannia dlia tsyklichnoho hidrotermichnoho nasychennia [Hydrophobic treatment of construction products using equipment for cyclic hydrothermal saturation]. *Suchasni tekhnologii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi - Modern technologies, materials and structures in construction*, 36(1), 58–63. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2024-1-58-63>.

Отримано 20.03.2025

UDC 691.32:532.546

Oleh Horiun

Doctor of Philosophy, Assistant, Department of Engineering Systems in Construction
Vinnytsia National Technical University (Vinnytsia, Ukraine)

E-mail: oleggoriun@vntu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5678-835X>

FEATURES OF DISTRIBUTION OF IMPREGNATING LIQUIDS IN THE PROCESS OF IMPULSE IMPREGNATION OF CONCRETE

One of the promising areas of concrete modification is using pulsed impregnation, which is based on application of pressure pulses to improve distribution of the impregnating liquid in the capillary-porous structure of concrete. However, despite the existing studies on distribution of liquids in the capillary-porous structure of concrete and impregnation methods, there remain problems that have not received comprehensive scientific justification. In particular, the relationship between capillary pressure losses, capillary pressure and shock pressure, which is caused by fluid pulses, has not been sufficiently studied.

The purpose of the study is to determine the features of distribution of impregnating liquids in concrete under the influence of pulsed impregnation, to establish the main regularities of the process, in particular, the relationship between capillary pressure losses, capillary and pulsed pressure to justify effective use of the pulsed method of concrete treatment.

In the paper, the effect of pulse pressure on the penetration of liquid into the capillary-porous structure of the material is analysed, in particular on the depth of impregnation, the uniformity of the distribution of the impregnating liquid in the volume of concrete and the efficiency of processing. The relationship between pressure losses, capillary pressure and pulse pressure, which determine the dynamics of the movement of the impregnating composition, is established. The mechanisms of liquid penetration into closed and open pores of concrete under the action of pulse loading are considered. Taking into account the geometric structure of the pore, which is represented by the model in the form of a spherical figure, as well as the size of the capillaries of concrete, allows us to establish their relationship with the speed of movement of the impregnating liquid under the action of excess static and pulse pressure. The obtained equations for both the open pore and the closed pore with trapped residual air inside reflect the pressure drop caused by the application of pressure pulses according to the adopted sinusoidal law, which determines the movement of the impregnating composition in the concrete structure. The established relationship between the pressure drop, pressure loss in the capillaries and the pulse effect of the liquid pressure makes it possible to predict the behavior of various impregnating compositions, which allows adapting the impregnation technology and increasing its efficiency for concretes with different densities and porosity.

Practical significance of the work lies in possible application of the obtained results to develop technological solutions for improving protective and strengthening methods of concrete processing in the construction industry.

Keywords: concrete; capillary-porous structure; impregnation; saturation; mathematical model; fluid pressure pulses movement of fluid in a porous body; building materials and products; concrete modification.

Fig.: 3. References: 13.

Ада Василівна Зуска¹, Олександр Євгенович Янкін², Тетяна Миколаївна Чайка³

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (Дніпро, Україна)
E-mail: zuska.a.v@nmu.one. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5693-6647>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри геодезії
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (Дніпро, Україна)
E-mail: Yankin.O.Ye@nmu.one. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3208-3253>

³асистент кафедри геодезії
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (Дніпро, Україна)
E-mail: Chaika.T.M@nmu.one. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7822-2607>

ВПЛИВ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ МАТРИЦЬ ЦИФРОВИХ ФОТОКАМЕР НА ТОЧНІСТЬ ТОПОГРАФІЧНОГО ЗОБРАЖЕННЯ

На основі принципів застосування методу аерофотозйомки для картографування земель у роботі визначено найбільш впливові чинники на його вартість. В оглядово-інформаційній статті обґрунтовано вплив типу фотокамер на якість зображень. Дані аерофотозйомки широко почали застосовуватися в геодезії, землеустрої та в будівництві. Проблемою методу аерофотозйомки є його вартість. Огляд попередніх публікацій стосовно поставленої проблеми показав, що більшість досліджень присвячено якості й точності зображень, отриманих методом аерофотозйомки для розв'язування спеціальних задач, але ніде не зафіксовано досліджень відносно вартості цього методу. Визначено, що головним чинником, який впливає на вартість аерофотозйомки є роздільна здатність матриці фотокамери. Для зменшення вартості запропоновано практично підходити до вибору оптимального типу цифрової фотокамери та її роздільної здатності, не порушуючи вимоги до якості та точності зображень. За результатами аналізу попередніх публікацій зроблено порівняльний аналіз взаємозв'язку роздільної здатності різних типів фотокамер; точності цифрових зображень на місцевості для масштабів стандартного ряду; вартості фотокамер. Представлені результати будуть мати практичне значення в підготовці технічного завдання на виконання аерофотозйомки для участі в тендері та під час складання технічного проєкту, враховуючи побажання замовника.

Ключові слова: аерофотозйомочне обладнання; розмір матриці фотокамери; роздільна здатність; цифрове зображення; вартість.

Табл.: 4. Бібл.: 7.

Актуальність теми. Аерофотозйомка з літальних апаратів для картографування земельних ділянок різного призначення найбільше залежить від роздільної здатності фотокамери. Отримати якісне зображення з найкращою роздільною здатністю та прийнятною вартістю для замовників на сьогодні є актуальним.

Постановка проблеми. Встановлення меж земель територіальних громад, порушених наслідком воєнних дій та поверхневого видобутку корисних копалин, для будівництва житлових і промислових об'єктів та споруд опирається на сучасні апробовані на практиці наземні методи зйомки та дистанційні методи – аерокосмічні зйомки. Найбільш застосованим у геодезії та будівництві є метод аерофотозйомки з літального безпілотного апарата.

Проблема цього методу – це його вартість, яка залежить від параметрів аерофотозйомки, типу цифрових фотокамер і їхньої просторової роздільної здатності, програмного забезпечення та терміну обробки результатів зйомки. Деякі компанії, що виконують аерофотозйомку, для підняття свого авторитету серед замовників використовують фотокамери з надвисокою просторовою роздільною здатністю 60 мегапікселів (МП), що дозволяє розпізнавати зображення найменшого об'єкта 1 см на піксель. Сьогодні серед виробників пропонуються цифрові камери з роздільною здатністю понад десятки мільйонів пікселів. Звісно, чим більша кількість пікселів цифрової камери, тим більша роздільна здатність матриці й вища деталізація зображення. Але, на думку виконавців, надвисока роздільна здатність матриці фотокамери найбільше впливає на затрату часу оброблення знімків та загальну вартість аерофотозйомки. Найчастіше вартість стає мотивом незгоди замовника. Щоб уникнути цієї проблеми, під час розроблення технічного проєкту треба практично підходити до вибору типу фотокамери, роздільної здатності матриці, дотримуючись вимоги щодо розміру пікселя

аерофотознімку на місцевості. На наш погляд, технічне завдання на виконання аерофотозйомки повинен складати фахівець, який має практичний досвід у процесі виконання зйомки. Вартість результатів аерофотозйомки будуть залежить від складеного технічного завдання, у якому замовник безпомилково пояснює необхідність аерофотозйомки земельної ділянки та мету отримання кінцевого результату. Це має значення для тендерного аукціону. На підставі технічного завдання розробляється технічний проєкт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування методу аерофотозйомки та сучасного аерофотозйомочного обладнання дозволяє підвищити точність і якість картографічного зображення для побудови цифрових топографічних карт і планів. Важливу роль для отримання якісного цифрового зображення відіграють розміри матриці фотокамери, що може впливати на вартість аерофотограмметричних робіт. Для дослідження точності побудови зображень залежно від роздільної здатності матриць, було виконано огляд ряд публікацій відносно теми статті.

Теоретичні питання технології цифрової фотограмметрії, комп'ютерного опрацювання цифрових зображень, технології побудови цифрової моделі місцевості (ЦММ), рельєфу (ЦМР) і цифрових ортофотопланів за цифровими аерофотознімками розглянуто в книзі Дорожинського О., Л. і Тукай Р. «Фотограмметрія» [1].

У роботі [2] надано інформацію про типи цифрових фотокамер і матриць, розміри матриць, роздільну здатність матриць та одиниці вимірювання цифрових зображень;

Публікації [3], [4], рекомендують критерії оцінки аерокосмічних зображень для кадастрових робіт і деякі вимоги до аерокосмічної зйомки.

Проєкт про «Порядок топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500» [5] розкриває застосування аерозйомки для створення цифрових моделей рельєфу, місцевості, цифрових ортофотопланів і топографічних планів стандартного масштабного ряду та тривимірних моделей будівель і споруд; встановлює необхідну точність цифрових зображень певного масштабу на місцевості.

Автори статті [6] представили методику вибору характеристик оптичної системи та основні етапи процесу обробки цифрових фотозображень апаратурою безпілотного літального апарата. Взаємозв'язок між оцінкою точності положення точки на місцевості та параметрами фотографування безпілотного літального апарату встановлено в роботі [7].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. З огляду на попередні публікації питання вартості методу аерофотозйомки залежно від роздільної здатності матриць фотокамер не розглядалося.

Мета роботи – вибір оптимального виду фотокамери для отримання якісних зображень для побудови цифрових зображень масштабу 1:500 – 1:5000 відповідно до чинних стандартів.

Виклад основного матеріалу. Якість цифрових зображень аерофотозйомки для картографування земельних ділянок різного призначення та розв'язування прикладних задач фотограмметрії залежить від застосовуваної цифрової фотокамери. Вибір оптимального типу цифрової фотокамери повинен задовольняти якість зображень, точність і вартість. Вибираючи цифрову фотокамеру, користувачі часто звертають увагу лише на роздільну здатність матриці камери тобто, на кількість мегапікселів, які визначають якість отриманих знімків (табл. 3). Існують й інші ознаки, за якими рекомендується вибирати камеру. Головним елементом фотокамери є її матриця, що фіксує зображення. Фотоматриця застосовується у вигляді спеціалізованої аналогової або цифро-аналогової інтегральної мікросхеми, що складається зі світлочутливих елементів [1]. У характеристиках цифрових камер часто вживається термін сенсор, замість – матриця. Матриця фотокамери складається з масиву світлочутливих осередків, від яких залежить якість отриманого зображення. Для фотографування в практиці існує два основних

типи матриць: CCD (ПЗЗ – матриця) і CMOS (КМОН – матриця), які відрізняються застосовуваними в них технологіями. На ринку фотокамер найбільш поширеними є цифрові камери з ПЗЗ – матрицею, але більшість моделей цифрових камер для телескопів і мікроскопів є CMOS – матриці. Основна відмінність є в тому, що в ПЗЗ – матриці інформація з комірок зчитується послідовно, а в CMOS – матрицях, інформація береться з кожної окремої клітинки. Тому, в ПЗЗ – матриці наступний знімок буде здійснено тільки після формування попереднього знімка. Тип КМОН – матриць значно дешевші у виготовленні та більш доступні для користувачів і КМОН – матриці споживають меншу кількість енергії чим ПЗЗ - матриці [1; 2].

Під час вибору цифрової камери користувачам варто звертати увагу на фізичний розмір матриці, що показує геометричну довжину та ширину в міліметрах або пікселях і визначає її якість. У технічних характеристиках фотокамери значення розміру сенсорів вказується у вигляді дробу 1/96 дюйма (") – 1/4, 1/3, 1/2, 5/8, 1/2" і т. п. Для вибору фотокамери необхідно знати, що розмір матриці буде більше у тієї цифрової камери, у якої знаменник зазначеного дробу буде менше, тобто сенсор (матриця) 1/2" буде більше сенсора 1/4" (табл. 1). Отже, від фізичного розміру матриці залежить кількість зібраного світла, а саме, чим більше фізичний розмір матриці, тим вища світлочутливість і краще співвідношення сигналу до шуму [2].

Розглянемо зв'язок фізичного розміру матриці у міліметрах і типу матриці, вираженому в 1/дюймах. Позначення типу матриці виражає не розмір її діагоналі, а зовнішній розмір колби передавальної трубки. У публікаціях виробників фотокамер зазначено, що немає поки математичної формули взаємозв'язку між типом матриці в частинах дюйма 1/дюйм і фізичним розміром діагоналі матриці в міліметрах. Користувачі за розмір сенсора приймають діагональ, яка дорівнює $\frac{2}{3}$ типу матриці. Розмір матриці визначається в оберненій пропорції, чим менше цифра під знаком дробу, тим отримане зображення буде більше і якісніше. Наприклад, розмір матриці 1/1,8 є кращим від матриці розміру 1/4". Так, матриця розміру 1/3" за технічними характеристиками не належить до напівпрофесійного фотографічного обладнання, тоді як матриці розміру 1/2,7", застосовуються в деяких напівпрофесійних моделях недорогого сегмента фотокамер.

Камери, які забезпечуються матрицями розміру 1/20", (5,1×6,0) мм, (0,21×0,24) дюйма і 1/1,8", (5,3×7,2) мм і (0,21×0,28) дюйма використовуються у професійних камерах високого класу та є найдорожчі серед відомих типів. Ці два типи матриць мають високу світлопоглинальну здатність, а розмір матриць (сенсора) впливає на якість знімків. Від розміру сенсора залежить кількість цифрового шуму, який передається на світлочутливі елементи матриці разом з основним сигналом. Через цифровий шум знімок може мати неприродний вигляд і бути схожий на знімок із точок різного кольору та яскравості. Шуми викликають дефекти в самій структурі сенсора, витік струму, заряд якого може пробити ізоляцію і переключитися з одного пікселя на інший. При цьому температура матриці підвищується від 6 до 8 градусів, а тепловий шум збільшується вдвічі [2].

Густота пікселів на одиницю площі чи ліній визначає роздільну здатність зображення. Роздільна здатність зображень переважно залежить від роздільної здатності фотоматриць, яка своєю чергою залежить від типу, площі, кількості фоточутливих елементів (пікселів) і їх щільності на одиницю поверхні. Наприклад, чим більший фізичний розмір пікселя, тим більша кількість інформації, чим вища роздільна здатність матриці, тим чіткіше та деталізоване зображення [2]. Розміри матриць фотокамер (мегапікселі) – це один із параметрів, який часто ускладнює вибір камери недосвідченого користувача. Як було зазначено вище, чим менше цифра під знаком дробу, тим розмір матриці більше і відповідно зображення більше та якісніше (табл. 1).

Таблиця 1 – Залежність фізичного розміру й типом матриці

Розміри матриці, мм	Розміри матриці, рх	Розміри матриці, дюйми (")	Тип матриці, 1/"
4,5×3,4	17×12,8	0,18×0,13	1/3,2"
5,4×4,0	20,4×15,1	0,21×0,16	1/2,7"
5,8×4,3	21,9×16,2	0,23×0,17	1/2,5"
6,2×4,6	23,4×17,4	0,23×0,18	1/2,3"
6,0× 5,1	22,7×19,3	0,21×0,24	1/2,0"
7,2×5,3	27,2×20,0	0,28×0,21	1/1,8"

Джерело: розроблено авторами.

Фактична роздільна здатність отриманих зображень може бути встановлена відносно екрана монітора, принтера, сфотографованих об'єктів з урахуванням їх перспективних спотворень під час зйомки та характеристики об'єктива. Точність вимірювання растрового зображення залежить від роздільної здатності самого зображення та екрана монітора, на який це зображення виведено.

Загальновідомо, що екран монітора, на який виведено зображення, не зможе показати більше деталей, ніж зафіксувала матриця фотокамери. Роздільна здатність монітора визначає кількість пікселів (рх) за шириною та висотою, яку він може відображати. Екран монітора шириною 640 і висотою 480 пікселів має сумарну кількість $(640 \times 480) = 0,31$ мегапікселя (МП), яка буде менше суми пікселів, яку відображає монітор з роздільною здатністю (1920×1080) рх = 1,96 МП.

Обґрунтовано, що монітори більшого розміру мають більшу роздільну здатність, а монітори менших розмірів – меншу. З цього слідує, що розміри того ж самого зображення, яке виводиться на екрани різних моніторів, можуть не збігатися. Розміри цих зображень будуть також під час друку.

Роздільна здатність цифрового (растрового) зображення характеризує його якість, яка визначається кількістю точок по горизонталі й вертикалі фізичного розміру та показує, наскільки дрібними є пікселі зображення. Показник кількості точок на дюйм (dpi) визначає роздільну здатність зображення, що має лінійні розміри (по горизонталі та вертикалі). Наприклад, для забезпечення роздільної здатності не менше 300 точок/dpi потрібно, щоб на дюйм растрового знімка по горизонталі або вертикалі припадало не менше 300 точок (пікселів). Для екранного перегляду файлу достатньо 72 dpi, а для роздруківки зображення не менше 300 dpi. Кількість точок на дюйм будь-якого зображення визначається розміром самого знімка.

Фізичний розмір файлу зображення пропорційний розміру зображення в пікселях тому, роздільна здатність зображення є поступкою між якістю зображення та розміром файлу. Зображення з більшою кількістю пікселів містять великий об'єм об'єктів і для їх збереження необхідно мати більше місця на диску, редагування цього об'єму займе більше часу. На підставі цього встановлено, що для великих файлів треба застосовувати формати стиснення такі як – GIF, JPEG (JPG), PNG і TIFF [1; 2], які значно впливають на розміри файлів, не змінюючи вихідної роздільної здатності, dpi (табл. 2).

Одиницями вимірювання растрових зображень є: точки на дюйм або піксель (dpi). Точність вимірювання зображення залежить від його якості, розміру файлу, способу оцифрування або методу створення готового зображення, формату файлу та інших параметрів. Значимі, що чим вищі вимоги до якості зображення, тим більшою має бути роздільна здатність. Роздільна здатність зображення показує дрібність, роздільність величини, що визначає кількість пікселів на одиницю площі (або одиницю довжини) [1; 2].

Наведемо приклад визначення роздільної здатності знімка розміром (25×25) см, $(9,84 \times 9,84)$ дюйма і (3676×3676) рх. Для цього кількість пікселів знімка по горизонталі 3676 рх помножити на 2,54 см і розділити на ширину знімка 25 см, отримаємо роздільною здатністю знімка, $\text{dpi} = 3676 \times 2,54 / 25 = 373,5$ рх/дюйм, де dpi кількість пікселів на дюйм = 1 рх / дюйм = 1/96, 1 дюйм = 2,54 см, 1 см = 37,78 рх, 1 дюйм = 96 рх.

Таблиця 2 – Зміна розміру знімка залежно від формату стиснення

Розмір знімку	Формат стиснення файлів у мегабайтах (Мб)			
	JPEG	GIF	PNG	TIFF
3676×3676 px (13,5 МП)	2,6 Мб	6,4 Мб	26,6 Мб	28,5 Мб
5472×3648 px (20 МП)	8,05 Мб	8,98 Мб	33,8 Мб	57,2 Мб

Джерело: розроблено авторами.

Зазначимо, що важливим критерієм для зображення, виведеного на екран монітора, є співвідношення сторін, яке визначається відношенням ширини зображення до його висоти, що виражається двома числами – 3:2 (три до двох), 4:3 (чотири до трьох) і т. д.

Співвідношення сторін не передає конкретні розміри знімка (зображення) в сантиметрах або дюймах і не показує кількість пікселів, а показує наскільки зображення по горизонталі ширше порівняно з його висотою. Наприклад, співвідношення 4:3 означає, що на кожні 4 одиниці ширини припадає 3 одиниці висоти, тому крихітне та велике зображення можуть мати однакові пропорції. Назване стосується і роздільної здатності – вона може бути 800×600 або 1600×1200 px, а співвідношення сторін завжди буде 4:3 [1; 2]. Це є важливою складовою для будь-якого візуального матеріалу, що допомагає відображати його належним зображенням без втрати якості.

З теорії фотограмметрії відомо, що під час використання аерофотознімку похибка m_x планового положення точки на поверхні місцевості обчислюється за відомою формулою [3; 4; 5]:

$$m_x = m_\phi \cdot \frac{H}{f} = m_\phi \cdot m, \quad (1)$$

де H – висота фотографування;

m_ϕ – похибка фотограмметричних вимірювань точок зображення;

f – фокусна віддаль фотокамери;

m – знаменник масштабу знімка.

Точність фотограмметричних вимірювань з застосуванням сучасних аерофотознімальних систем дозволяє вимірювати координати точок на знімку з точністю $m_\phi = 0,007 - 0,015$ мм [3; 4; 5]. Оскільки за точність вимірювання картографічного зображення прийнята величина 0,2 мм у масштабі топографічних карт і планів М, то замінивши у формулі (1) m_x на цю величину отримаємо

$$0,2 \text{ мм} = m_\phi \cdot m \quad (2)$$

З урахуванням формули (2) знаменник масштабу m знімка обчислюється за формулою

$$m = \frac{0,2 \text{ мм} M}{m_\phi} \quad (3)$$

Основним геометричним параметром знімальної системи є просторова роздільна здатність, яка виражається максимальним розміром пікселя на місцевості залежно від масштабу зображення. Під час аерофотозйомки технічними характеристиками знімальних цифрових систем є: фокусна відстань f , розмір пікселя зображення Δx в мм і висота фотографування H , від якої залежить просторова роздільна здатність P [4; 5].

$$P = \frac{H}{f} \cdot K \cdot \Delta x, \quad (5)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від якості зображення та від точності вимірювання. Коефіцієнт для обчислення P приймають рівним 2, тоді розмір пікселя на зображенні становитиме вдвічі більше, але він повинен бути в межах вимоги точності фотографічних вимірювань. За точність вимірювання зображень Δx приймають 0,007 мм у пікселях. Для забезпечення точності масштабу зйомки залежно від характеристик місцевості для стандартних масштабів зйомки повинен виконуватися критерій розміру пікселя аерознімків на місцевості [6]. Максимальний розмір пікселя на місцевості наведено в табл. 3

Таблиця 3 – Розмір пікселя на місцевості залежно від масштабу зображення

Масштаб зйомки	Характеристика об'єкта зйомки	Максимальний розмір пікселя аерознімків на місцевості, м
1:5000	Забудовані території міст і селищ, сільських населених пунктів, незабудовані території, сільськогосподарські угіддя	0,35
1:2000	Забудовані території міст і селищ, сільських населених пунктів, незабудовані території, сільськогосподарські угіддя	0,14
1:1000	Забудовані території міст і селищ, сільських населених пунктів, незабудовані території, сільськогосподарські угіддя	0,07
1:500	Забудовані території міст і селищ, сільських населених пунктів, незабудовані території, сільськогосподарські угіддя	0,035

Часто замовник ставить умови, щоб роздільна здатність зображення становила 300 дрі тобто, щоб в одному дюймі містилося 300 пікселів. Прийmemo оригінальний розмір зображення розміром 4000 по довжині і 3000 пікселів по ширині. Розмір цього зображення у дюймах за довжиною $y = 4000/300 = 13,3''$, в сантиметрах – $13,3'' \times 2,54 \text{ см} = 33,78 \text{ см}$ і в пікселях – $13,3'' \times 96 = 1276,8 \text{ px}$; за шириною $x = 3000/300 = 10''$, 25,4 см, 960 px, розмір зображення в пікселях – $1276,8 \times 960 = 1,22 \text{ МП}$.

Для аналітичного розрахунку технічного проєкту аерофотозйомочних робіт використовують технічні характеристики відповідного типу фотокамери та параметри аерозйомки.

До технічних характеристик аерофотокамери віднесено [5]: N_{px} – кількість пікселів матриці по ширині маршруту; N_{py} – кількість пікселів матриці вздовж напрямку маршруту; p – фізичний розмір пікселя матриці; f – фокусна відстань об'єктива (ці параметри зазначаються в документі, що підтверджує виконання лабораторного калібрування); P – роздільна здатність аерофотознімку на місцевості (зазначається в технічному завданні замовником); l_x – фізичний розмір матриці за шириною; l_y – фізичний розмір матриці за довжиною (для аерофотокамер кадрового типу).

Параметри аерозйомки визначають [5]: H – висота аерофотозйомочних робіт і m – знаменник масштабу аерофотозйомки (названі параметри розраховуються); L_x – величина поперечного перекриття аерофотознімку на місцевості; L_y – величина повздовжнього перекриття аерофотознімків маршруту (для аерофотокамер кадрового типу).

Фізичний розмір матриці за шириною та довжиною обчислюється за формулами, зазначеними в [5].

$$x = N_{px}(x) \cdot p; \quad y = N_{py}(y) \cdot p. \quad (6)$$

Знаменник масштабу m аерофотозйомки знаходять із виразу (7)

$$m = H / f. \quad (7)$$

Роздільна здатність P знімка в масштабі стандартного ряду (розмір пікселя на місцевості) знаходять за формулою

$$P = m \cdot p.$$

Перекриття аерофотознімків на місцевості повздовжнє L_y і поперечне L_x аерофотозйомочного маршруту розраховують за формулами:

$$l_y = P \cdot N_{px}(y); \quad l_x = P \cdot N_{px}(x).$$

Висота фотографування обчислюється

$$H = P \cdot \frac{f}{p}. \quad (6)$$

Проаналізуємо основні параметри цифрової фотокамери для виконання аерофотозйомки. Розмір пікселя матриці (1 GSD x) визначається,

$$GSDx = (l_x \text{ мм} / N_x) px.$$

Максимальний розмір пікселя знімка на місцевості буде таким

$$GSD = H / (f / GSDx),$$

Під час вибору оптимального типу цифрової фотокамери необхідно враховувати: фізичний розмір пікселя від якого пропорційно залежить об'єм інформації та динамічний діапазон матриці; роздільну здатність матриці, від якої залежить чітке та деталізоване зображення. Роздільна здатність і фізичний розмір матриці використовуються лише для зображення на паперовому носії. Розміри зображення в пікселях надають кількісний об'єм даних.

Керуючись такими вимогами авторами було складено порівняльний аналіз типів фотокамер, розміри фотоматриць, і пікселя, розмір пікселя точність аерофотознімків у пікселях на місцевості для стандартних масштабів топографічних зображень (табл. 4).

Таблиця 4 – Параметри матриць фотокамер для аерозйомки з літальних апаратів та максимальні розміри пікселів на місцевості в зазначених масштабах

Тип камери, матриця	1 GSD піксель	Розмір матриці камери, мм, пікселі	Роздільна здатність матриці, МП	Фокусна відстань f , мм	Допустимий розмір пікселя аерознімків на місцевості для масштабів зображень		Вартість фотокамери гр.
					P, м	1: m	
1	2	3	4	5	6	7	8
Canon IXUS, матриця CCD, 1/2,3"	0,002	6,17×4,55 3648×2736	20,5	6,0 – 40	0,01 0,02 0,04 0,10	1:500 1:1000 1:2000 1:5000	17360,0
Canon Power Shot S100 матриця CMOS, 1/1,7"	0,002	7,44×5,58 4009×2992	12	24 – 120	0,01 0,02 0,04 0,10	1:500 1:1000 1:2000 1:5000	195078,0
Canon IXUS, матриця CCD, 1/2,3"	0,002	6,17×4,55 3648×2736	20,5	6,0 – 40	0,01 0,02 0,04 0,10	1:500 1:1000 1:2000 1:5000	17360,0
DJI Phantom 3 Pro, Sony Exmor, 1/2.3"	0,002	6,2×4,6 4000×3000	12,0	20	0,01 0,02 0,04 0,10	1:500 1:1000 1:2000 1:5000	26070,0
Canon 550 D, матриця APS-C	0,004	23×15,5 5184×3456	17,9	18 – 135	0,02 0,04 0,08 0,20	1:500 1:1000 1:2000 1:5000	19000,0

Закінчення таблиці 4

1	2	3	4	5	6	7	8
Sony Alpha ILCE6000, матриця APS-C	0,004	23,5×5.6 6000×4000	23,4	16 – 50	0,02 0,04 0,08 0,20	1:500 1:1000 1:2000 1:5000	18898,0
Nikon P 7000, матриця КНОП	0,004	23,6×15,6 4928×3264	16,1	18 – 105	0,02 0,04 0,08 0,20	1:500, 1:1000, 1:2000, 1:5000	28000,0
Sony A6000, CMOS, APS-C	0,004	23.5×15.6 6000×4000	24,3	16 – 50	0,020 0,040 0,080 0,200	1:500, 1:1000, 1:2000, 1:5000	18000 – 27520,0
DJI Phantom 4 Pro, матриця CMOS 1"	0,004	21,9×14,6 5472×3648	20	84,2	0,020 0,040 0,080 0,200	1:500, 1:1000, 1:2000, 1:5000	58786,0
ILCE-QX1, матриця APS-C	0,004	23,2×15,4 5456×3632	20,1	16 – 50	0,020 0,040 0,080 0,200	1:500, 1:1000, 1:2000, 1:5000,	11024,0
Samsung NX100, матриця CMOS	0,005	23.4×15.6 4592×3056	15,1	20 – 50	0,025 0,050 0,100 0,250	1:500 1:1000 1:2000 1:5000	12659,0
Canon EOS 5D, матриця CMOS	0,008	635,8×23,9, 4368×2912	12,7	75	0,041 0,082 0,164 0,410	1:500 1:1000 1:2000 1:5000	73562,0 – 104999
Sony ICX-413AQ, датчик CCD: 1,8"	0,008	23,5×15,72 3020×2016	6,1	36	0,04 0,08 0,16 0,400	1:500, 1:1000, 1:2000, 1:5000	46035,0

Джерело: розроблено авторами.

Висновок. У роботі вперше запропоновано практичний підхід до вибору типу цифрових фотокамер з метою здешевлення вартості аерофотозйомочних робіт. За результатами досліджень відповідно до поставленої мети зроблено висновки.

Під час вибору оптимального типу цифрової фотокамери для аерофотозйомки необхідно враховувати фізичний розмір пікселя (GSD) матриці та роздільну здатність зображення заданого масштабу. Зауважимо, що надвисока роздільна здатність фотокамери збільшує якість зображень, детальність об'єму інформації, що призводить до збільшення часу обробки й вартості робіт.

Тип фотокамери, розмір матриці та розмір пікселя матриці є ті чинники, що найбільш впливають на точність зображення (розмір пікселя на місцевості), розміру пікселя аерофотознімку на місцевості залежить від масштабу зображення.

Вартість фотокамер пропорційно залежить від фізичного розміру матриці та фокусної відстані, але це не впливає на розмір пікселя аерофотознімку на місцевості.

Представлені результати мають практичне значення в розробленні технічного завдання на виконання аерофотозйомки для участі в тендерних торгах, а також під час складання технічного проєкту враховувати побажання замовника та вносити коректування. На нашу думку, технічне завдання на виконання аерофотозйомки повинен виконувати фахівець, який має досвід у виконанні аерофотозйомочних робіт.

Список використаних джерел

1. Дорожинський, О.Л., Тукай, Р. (2008). *Фотограмметрія* : підручник. Львівська політехніка. <https://studfile.net/preview/16666986/>.
2. Цехмістро, Г. Матриця цифрової камери. Типи і розмір матриць. *OpticalMarket*. <https://opticalmarket.com.ua/ua/matrica-kamery.html>.
3. Дорожинський, О.Л., Почкін, С. (2007). Критерії оцінки аерокосмічних зображень для кадастрових робіт. *Геодезія, картографія і аерофотознімання* : укр. міжвід. наук.-техн. зб., 68, 172-176. <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/b6f36c6e-3285-4783-af0d-9d0a93157f97/content>.
4. Дорожинський, О.Л., Почкін, С. (2009). Про деякі вимоги кадастрових робіт до аерокосмічного знімання. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 1(17), 209-216. https://vlp.com.ua/files/35_24.pdf.
5. Даник, Ю.Г., Проценко, М.М. (2013). Вимоги до оптичної системи та процесу обробки цифрових фотозображень апаратурою безпілотного літального апарата. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, (1), 42-47. <https://eztuir.ztu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2603/1/8.pdf>.
6. Проект наказу Міністерства аграрної політики та продовольства України (2021) «Про затвердження Порядку топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500». <https://land.gov.ua/proekt-nakazu-ministerstva-agrarnoyi-polityky-ta-prodovolstva-ukrayiny-pro-zatverdzhennya-poryadku-topografichnoyi-zjomky-u-masshtabah-15000-12000-11000-ta-1500>.
7. Zuska, A., Goychuk, A., Riabchii, V., Riabchii, V. (2022). Methods of mapping the lands disturbed by mining operations and accuracy of cartographic images obtained from Unmanned Aerial Vehicles: A review. *Mining of Mineral Deposits*, 16(1), 58-67. <https://doi.org/10.33271/mining16.01.058>.

References

1. Dorozhynskyi, O.L., Tukai, R. (2008). *Fotogrammetriia [Photogrammetry]*. Natsionalnyi universytet «Lvivska politehnika».
2. Tsekhmistro, H. (2013). *Matrytsia tsyfrovoy kamery. Typy i rozmir matryts [Digital camera matrix. Types and sizes of matrices]*. <https://opticalmarket.com.ua/ua/matrica-kamery.html>.
3. Dorozhynskyi, O.L., Pochkin, S. (2007). Kryterii otsinky aerokosmichnykh zobrazhen dlia kadastrykh robit [Evaluation criteria of aerospace images for cadastral works. Geodesy, cartography and aerial photography]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia – Geodesy, cartography and aerial photography*, 68, 172–177.
4. Dorozhynskyi, O., Pochkin, S. (2009). Pro deiaki vymohy kadastrykh robit do aerokosmichnoho znimannia. [About some requirements for cadastral works for aerospace surveying]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern achievements in geodetic science and production*, 1(17), 210 – 215.
5. Proekt nakazu Ministerstva ahrarnoi polityky ta prodovolstva Ukrainy «Pro zatverdzhennia Poriadku topohrafichnoi ziomky u masshtabakh 1:5000, 1:2000, 1:1000 ta 1:500». [Project on the approval of the Procedure for topographical surveying at scales of 1:5000, 1:2000, 1:1000 and 1:500]. (2021). <https://land.gov.ua/proekt-nakazu-ministerstva-agrarnoyi-polityky-ta-prodovolstva-ukrayiny-pro-zatverdzhennya-poryadku-topografichnoyi-zjomky-u-masshtabah-15000-12000-11000-ta-1500>.
6. Danyk, Yu.H., Protsenko, M.M. (2013). Vymohy do optychnoi systemy ta protsesu obrobky tsyfrovyykh fozobrazhen aparaturoiu bezpilотноho litalnoho aparata. [Requirements for the optical system and the process of processing digital photo images by the equipment of an unmanned aerial vehicle]. *Visnyk ZhDTU – The Journal of Zhytomyr State Technological University. Engineering*, 1(64), 42-47.
7. Zuska, A.V., Goychuk, A.P., Riabchii, V.V. & Riabchii, V.A. (2022). Methods of mapping the lands disturbed by mining operations and accuracy of cartographic images obtained from Unmanned Aerial Vehicles A review. *Mining of Mineral Deposits*, 16(1), 58 – 67.

Отримано 01.02.2025

Ada Zuska¹, Oleksandr Yankin², Tatiana Chaika³

¹PhD of technical sciences, associate professor of the Department of Geodesy
Dnipro Polytechnic National Technical University (Dnipro, Ukraine)

E-mail: zuska.a.v@nmu.one. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5693-6647>

²PhD of technical sciences, associate professor of the department of geodesy
Dnipro Polytechnic National Technical University (Dnipro, Ukraine)

E-mail: Yankin.O.Ye@nmu.one. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3208-3253>

³ Assistant Professor of the Department of Geodesy

Dnipro Polytechnic National Technical University (Dnipro, Ukraine))

E-mail: Chaika.T.M@nmu.one. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7822-2607>

INFLUENCE OF THE RESOLUTION CAPACITY OF DIGITAL CAMERA MATRICES ON TOPOGRAPHIC IMAGE ACCURACY

Based on the principles of using the aerial photography method for land mapping, the most influential factors on its cost are determined in the work. The presented article is of a review and informational nature and presents some studies on the influence of aerial photography equipment on the quality of aerial photographs. The use of modern aerial photography equipment increases the accuracy and quality of images for the production of digital terrain models, relief, orthophotomaps and digital topographic maps and plans. Aerial photography data provides a perspective for solving various problems in the field of geodesy, land management and construction. It should be noted that the quality of the images depends mainly on the resolution of the camera and the device on which they are displayed.

The problem with the aerial photography method is its cost, which depends on the parameters of aerial photography, technical characteristics of cameras, software and processing time of aerial photographs. Reducing the cost of aerial photography is currently the most important issue for the customer. The authors found that the main factor influencing the cost of aerial photography is the resolution of the camera. The aim of the work is to determine the optimal types of cameras to reduce the cost of aerial photography without compromising the quality of the digital images.

A review of previous publications on the problem has shown that most studies have been devoted to the accuracy of raster images for solving various tasks, and the issue of the cost of aerial photography and the factors affecting it have not been considered at all. The cost of aerial photography is often a source of conflict between the client and the provider. Based on this, we conclude that in the design of aerial photography works, it is necessary to take a practical approach to the choice of the optimal type and resolution of cameras to obtain high quality digital images. The resolution of images must meet legal requirements and ensure the accuracy of digital topographic maps at a standard range of scales. In this way, the resolution of cameras can be combined with quality of images and cost of work, and a customer can adjust a technical task according to their requirements. Technical parameters of a task at the expense of raster image resolution, accuracy and compliance with standards change depending on the tasks set.

Keywords: photography equipment; camera matrix size; resolution; digital image; cost.

Table: 4. **References:** 7.

Інна Володимирівна Гамаюн¹, Марина Олегівна Пілічева²

¹студентка 1 курсу магістратури кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)
E-mail: innavl2002@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8730-1580>

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем
Харківський національний університет імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)
E-mail: maryna.pilicheva@kname.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1733-7534>
Scopus Author ID: 57215290310, Researcher ID: ABG-5067-2020

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДАНИХ ІЗ ВІДКРИТИХ ДЖЕРЕЛ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ БАЗИ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ

У статті досліджено особливості використання даних з відкритих джерел з метою їх інтеграції для формування бази геопросторових даних територіальної громади. Розроблено систему класифікації відкритих джерел геопросторових даних за шістьма категоріями. Проведено порівняльний аналіз картографічних сервісів та ресурсів з доступним експортом геопросторових даних. Визначено, що більшість геопросторової інформації з картографічних сервісів можливо отримати у відкритих форматах, таких як: GeoJSON, KML (XML), SHP, проте точність даних варіює від 1 до 15 м. Визначено переваги та недоліки джерел геопросторових даних, а також встановлено, що тільки їх інтеграція дозволить сформувати базу геоданих з повною інформацією про об'єкти територіальної громади.

Стаття є публікацією науково-методичного характеру.

Ключові слова: база геопросторових даних; геоінформаційні системи; територіальна громада; відкриті дані; картографічний сервіс, інтеграція даних.

Рис.: 1. Табл.: 3. Бібл.: 21.

Актуальність теми дослідження. Забезпечення територіальних громад достовірною та актуальною інформацією щодо геопросторових даних є одним з основних викликів сучасної землепорядної та геодезичної діяльності. З урахуванням сьогоденних тенденцій децентралізації та реформування у сфері управління земельними ресурсами в Україні, створення бази геопросторових даних (БГД) стає важливим кроком для забезпечення прозорості та ефективності в ухваленні рішень на всіх рівнях управління [1]. Це дозволяє органам місцевого самоврядування та іншим зацікавленим сторонам мати доступ до точної та актуальної інформації, що сприяє кращому плануванню, розвитку та управлінню територіями загалом.

Умови активного розвитку цифрових технологій сприяють інтеграції відкритих джерел геоданих, таких як OpenStreetMap, космічні знімки, дані дистанційного зондування Землі тощо. Водночас, попри наявність значного масиву відкритих даних, процес їх систематизації та інтеграції у єдину базу геопросторових даних територіальних громад залишається методологічно не достатньо розробленим. Таким чином, дослідження можливостей застосування даних з відкритих джерел для формування бази геопросторових даних територіальної громади є актуальним науково-практичним завданням у сфері геодезії та землеустрою, вирішення якого сприятиме вдосконаленню інформаційного забезпечення процесів управління територіальним розвитком в Україні.

Постановка проблеми. Цифрові трансформаційні процеси усіх сфер діяльності суспільства ставлять перед галуззю землеустрою та містобудування нові виклики, пов'язані з необхідністю інтеграції геопросторових даних територіальної громади, для чого на початковому етапі виконується формування БГД. Структура бази геоданих обов'язково повинна включати геопросторові дані для забезпечення реалізації комплексного плану просторового розвитку територіальної громади, що на законодавчому рівні містить чіткі вимоги до формату даних та їх узгодженості [2]. При цьому першочерговою проблемою є відсутність достовірної та верифікованої інформації, яка могла б бути використана під час формування та наповнення БГД. Відкриті дані, такі як топографічні карти, супутникові знімки, матеріали дистанційного зондування землі, дані картографічних джерел, таких як: OpenStreetMap або Overpass, мають значний потенціал, однак їх застосування потребує додаткової перевірки та адаптації до сучасних потреб громад.

Вирішення цієї проблеми є важливим як з наукової, так і з практичного погляду. По-перше, воно сприяє удосконаленню методик використання відкритих джерел для створення БГД. По-друге, воно дозволяє забезпечити територіальні громади доступом до просторової інформації, необхідної для ефективного управління земельними ресурсами, планування територій, розробки комплексних планів просторового розвитку та інших аспектів управління. З практичного погляду це забезпечить територіальні громади інструментарієм для ефективного управління просторовим розвитком території на основі актуальних та достовірних даних. Як результат, розв'язання цієї проблеми сприятиме розвитку теоретико-методологічних засад формування баз геопросторових даних та вдосконаленню методів інтеграції різних видів та форматів просторової інформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тема використання відкритих геопросторових даних та їх інтеграції в єдині бази даних активно досліджується як вітчизняними, так і закордонними науковцями, що підтверджує актуальність та важливість цієї проблеми. Особлива увага при цьому приділяється методологічним аспектам збору, обробки та верифікації даних з відкритих джерел.

Сьогодні відкриті дані застосовуються у різних галузях. Прикладом такого застосування може слугувати наукова праця [3], у якій досліджено переваги картографічних сервісів Google Maps, Bing Maps, OpenStreetMap, Mapbox, та їх потенціал для інтеграції в геоінформаційні системи. Використання відкритих геопросторових даних та інструментів з відкритим доступом для управління лісовими ресурсами, зокрема методів дистанційного зондування, краудсорсингу та активного залучення геоінформаційних систем (ГІС) для забезпечення ефективного управління лісовими екосистемами, наведено у роботі [4]. Відкриті дані активно використовуються при дослідженні водного фонду, наприклад, вченими запроваджено вебдодаток для перегляду даних про якість води, що використовує відкриті геопросторові дані для архівування, перегляду та аналізу даних [5]. Методика використання даних дистанційного зондування для моніторингу водного середовища досліджено в [6-7], де проведено аналіз офіційних онлайн-джерел безкоштовних геопросторових даних, що можуть бути використані в ГІС для вирішення завдань управління водними об'єктами. Активно використовуються ресурси таких порталів, як ESA, International Soil Moisture Network та EOS, які забезпечують доступ до відкритих геоданих про вологість ґрунтів, що є важливим для моделювання екосистем і аграрного планування [8].

У дослідженнях вчених також підіймається тема еволюції методів збору геопросторових даних, включаючи використання польових даних, фотографій та сучасних технологій ГІС, а також інтеграцію відкритих даних у процес картографування. Наприклад, у роботі [9] наголошено на важливості використання відкритих джерел для зниження витрат і забезпечення актуальності інформації. У науковій праці [10] проаналізовано інструменти і програмне забезпечення для інтеграції супутникових даних у ГІС-проекти, акцентується увага на основних провайдерах картографічних ресурсів, таких як Google Map, Bing Map, OSM, а також на важливість об'єднання різних джерел даних для забезпечення точності та ефективності аналізу геопросторових даних.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій у сфері використання джерел відкритих геопросторових даних дає змогу констатувати наявність певних прогалин у науковому опрацюванні досліджуваної проблематики. Насамперед слід зазначити, що питання формування баз геопросторових даних на рівні територіальних громад досі не отримало належного висвітлення в наукових працях. Більшість дослідників зосереджують увагу на загальних аспектах використання відкритих геоданих або на їх застосуванні для вирішення вузько-спеціалізованих завдань, залишаючи поза увагою специфіку роботи з просторовими даними в контексті потреб територіальних громад.

Важливою та водночас недослідженою складовою залишається питання систематизації та класифікації джерел вихідних геопросторових даних, які можуть бути використані для наповнення БГД територіальних громад. Хоча у статі [11] було представлено діаграму класифікації сучасних методів збирання геопросторових даних, комплексний підхід до класифікації джерел відкритих геопросторових даних та визначення їх ролі у формуванні БГД територіальних громад досі не було розроблено.

Також недостатньо дослідженим залишається питання методологічного забезпечення процесу відбору та верифікації даних з відкритих джерел для потреб територіальних громад. Зокрема, відсутні чіткі критерії оцінювання якості та достовірності геопросторових даних з різних відкритих джерел, що ускладнює процес їх практичного застосування в управлінні територіями.

Таким чином, виникає необхідність у проведенні комплексного дослідження, спрямованого на розробку науково обґрунтованої класифікації джерел відкритих геопросторових даних та методології їх застосування для формування БГД територіальних громад.

Мета дослідження (статті). Метою дослідження є розробка структурованої системи пошуку, класифікації джерел відкритих геопросторових даних та аналіз можливостей їх застосування для формування бази геопросторових даних територіальної громади з урахуванням сучасних вимог до актуальності, точності та доступності даних.

Виклад основного матеріалу. Важливим аспектом формування та розвитку бази геопросторових даних територіальних громад є комплексний підхід до збору та інтеграції вихідних даних. Для забезпечення повноти, достовірності та професійного рівня наповнення БГД необхідно охопити широкий спектр джерел інформації. Зокрема, на основі проведених досліджень встановлено, що ефективний підхід до збору даних сприяє не лише підвищенню якості та надійності бази даних, але й створює міцну основу для подальшого аналізу, моделювання та прийняття обґрунтованих рішень.

Систематизація та класифікація джерел вихідних даних дозволяє організувати процес збору інформації таким чином, щоб забезпечити її всебічність і структурованість. Для цього джерела вихідних даних були класифіковані за наступними категоріями:

- 1) картографічні основи (базові карти) – забезпечують основу для формування геопросторової інформації, включаючи топографічні та тематичні карти;
- 2) офіційна землевпорядна та містобудівна документація – джерело актуальних даних про земельні ділянки, їх цільове призначення та забудову;
- 3) супутникові знімки – дозволяють отримати актуальні дані про стан територій, динаміку змін та особливості ландшафту у різні часові проміжки;
- 4) висотні дані (DEM/HGT) – забезпечують інформацію про рельєф території, що є важливим для планування та моделювання;
- 5) вебресурси з можливістю експорту геоданих – відкриті джерела, які надають доступ до геоданих у різних форматах GDB, GeoJSON, KML, ShapeFile т. і, з подальшою можливістю конвертування у різні класи просторових об'єктів БГД;
- 6) плагіни для роботи з ГІС (QGIS, ArcGIS тощо) – інструменти, що інтегровані безпосередньо у середовище програмного забезпечення, для доступу до зовнішніх джерел геопросторових даних.

Запропонована класифікація створює чітку структуру для систематичного підходу до наповнення БГД (рис. 1). Охоплення різних категорій джерел дозволяє забезпечити комплексність та інтеграцію даних для розв'язання широкого спектра задач. Наприклад, використання супутникових знімків у поєднанні з офіційною документацією сприяє підвищенню точності моделювання та ухвалення рішень.



Рис. 1. Схема класифікації джерел вихідних даних

Джерело: розроблено авторами.

Важливим етапом проведеного дослідження став порівняльний аналіз функціональних можливостей та особливостей провідних картографічних сервісів (Bing Maps, OpenStreetMap (OSM), ESRI Standard Map та Google Maps), які можуть використовуватися як базова основа для формування БГД територіальних громад, за загальними критеріями (табл. 1):

- 1) функціональні можливості;
- 2) інструментальні можливості;
- 3) точність даних (міська та сільська місцевість, м);
- 4) актуальність даних (періодичність оновлення);
- 5) орієнтованість (цілі сервісу)
- 6) переваги;
- 7) недоліки;
- 8) можливі формати експорту.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз загальних можливостей та функціоналу лідерів картографічних сервісів

Критерії порівняння	Bing Map	OSM Standard Map	ESRI Standard Map	Google Map
1	2	3	4	5
Функціональні можливості	Пошук адрес, побудова маршрутів, супутникові знімки, тривимірні зображення	Інтерактивна мапа, можливість редагування та внесення даних користувачами	Інтеграція з ArcGIS, аналітика, тривимірні візуалізації	Пошук адрес, маршрутів, супутникові знімки, вулиці в реальному часі
Інструментальні можливості	Інтеграція з API (програмний інтерфейс), можливість отримання геокодування	API, завантаження та експорт даних у різних форматах	Потужний API для розробників, підтримка інтеграції з іншими сервісами ESRI	API для розробників, інтеграція з додатками Google (Google Earth, Google My Business)
Точність даних	1–15 метрів у міських зонах, 10–20 метрів у сільських територіях	1–15 метрів у міських зонах, залежить від внесених даних користувачами	1–3 метри для стандартних шарів, залежно від джерела, 5–50 у сільській місцевості	1–5 метри у міських зонах, 5–15 метрів у сільській місцевості

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4	5
Актуальність даних (періодичність оновлення)	Оновлення кожні 6–12 місяців, залежить від регіону інтересу	Часте оновлення завдяки внескам спільноти (3-6 місяці), але є регіони з меншою активністю	Залежить від джерела даних, оновлення кожні 6–24 місяці	Оновлення кожні 1–3 місяці, залежно від регіону
Орієнтованість (цілі сервісу)	Для бізнесу, різноманітних логістичних задач та планування маршрутів	Відкритий доступ для всіх користувачів, акцент на відкритість даних для дослідництва	Для наукових досліджень, просторового аналізу та професійного використання у сфері ГІС	Для широкого кола людей та професій, навігації, побудови маршрутів особливо для використання в комерційних цілях
Переваги	Висока деталізація супутникових знімків, зручний інтерфейс	Відкритість даних, можливість внесення змін користувачами та легкий експорт	Потужна інтеграція з аналітичними інструментами та продуктами ArcGIS	Висока деталізація карт, можливість перегляду вулиць у реальному часі
Недоліки	Ліміти на використання API, залежність від підключення до інтернету	Неоднорідність якості даних у різних регіонах, залежність від активності спільноти	Потребує доступу до комерційного ПЗ для повноцінного використання	Високі ціни на використання API для великих проєктів, обмеження у завантаженні даних
Можливі формати експорту	GeoJSON, KML, CSV, SHP	GeoJSON, XML, SHP	GeoJSON, SHP, GDB, KML, CSV	KML, GeoJSON, CSV, KMZ

Джерело: розроблено авторами.

Підсумовуючи, можна дійти висновку, що сфера картографічних сервісів демонструє високий рівень розвитку, забезпечуючи людство актуальними та деталізованими даними. Завдяки інтеграції з популярними картографічними сервісами та підтримці численних форматів базових карт, ГІС стають універсальним інструментом для роботи з задачами різних рівнів. Аналіз картографічних сервісів виявив їхні ключові переваги та недоліки. До основних переваг картографічних сервісів відносяться доволі часте оновлення, наприклад Google Map оновлюється кожні 3 місяці, можливість застосування відкритих форматів експорту, таких як GeoJSON, KML, SHP тощо; а відповідно до основних недоліків – не завжди висока точність даних (1-15 м), неоднорідність інформації, ліміти на використання та експорт тощо. Тому вибір платформи залежить від специфіки завдань і пріоритетів проєкту.

Для формування баз геоданих територіальних громад доцільно використовувати OpenStreetMap (OSM) та ESRI Standard Map. Відкрите джерело OSM забезпечує доступ, регулярне оновлення та підтримку популярних форматів, що підходить для землевпорядних та територіально-планувальних проєктів; у свою чергу ESRI Standard Map відзначається високою точністю даних (до 1–3 м), аналітичними можливостями та інтеграцією з ArcGIS, що робить його ідеальним для просторового аналізу та землевпорядних задач. Поєднання цих платформ забезпечує актуальність, деталізацію та професійний інструментарій для створення якісної БГД.

Ще одним із найважливіших аспектів роботи з геоінформаційними системами є наявність та доступність геопросторових даних. Вебресурси, що надають можливість експорту геоданих, стали критично важливим інструментом для досліджень і створення баз геоданих. Вони забезпечують доступ до різноманітних географічних та тематичних даних з усього світу, які є незамінними для планування, аналізу та управління земельними ресурсами на всіх рівнях. Завдяки безкоштовному доступу та можливості експорту даних у різних форматах, такі ресурси дозволяють зібрати, обробити та інтегрувати інформацію для використання у ГІС-програмах. Це значно спрощує процес створення карт, аналізу рельєфу, міського планування та інших геопросторових проєктів.

Під час дослідження виявлено ключові ресурси [12-21], які надають доступ до геопросторових даних із можливістю експорту у різних форматах. Кожен із цих ресурсів має свої особливості, включно з лімітами експорту, форматом даних та тематичним наповненням. Таблиця 2 є прикладом систематизованого представлення цих ресурсів та надає інформацію щодо їх наступних загальних характеристик:

- 1) ліміти для експорту геоданих з ресурсу;
- 2) доступні формати експорту;
- 3) особливості пошуку даних та експорту.

Таблиця 2 – Перелік ресурсів з вільним доступом до геоданих з подальшою конвертацією в різноманітних форматах

Назва ресурсу	Посилання на ресурс	Ліміти для експорту	Формати та особливості експорту
OSM (OpenStreetMap)	https://www.openstreetmap.org/#map=13/49.57789/34.40412	До 50000/1 експорт	Експорт геопросторових даних за обраною областю у форматі SHP, без фільтрації класів об'єктів або створення додаткових запитів.
CID (Center for innovations development)	https://cid.center/gisdata/	Без обмежень	Експорт певних наборів геоданих, базових шарів (ЦМР, горизонталі, інсоляція тощо), а також повний набір геопросторових шарів 3х ОТГ у форматі набору SHP-файлів.
Overpass turbo	https://overpass-turbo.eu/	Доступний експорт з лімітом до 80 MB	Експорт геоданих за областю інтересу, вводячи конкретний запит у вигляді коду або за допомогою інструменту помічника (наприклад «building=*»). Наявні наступні формати експорту: GeoJSON, GPX та KML.
Bbbike	https://extract.bbbike.org/	Доступний експорт з лімітом до 128 MB	Експорт згідно з обраною областю, без можливості обрати певні класи геоданих або створення запитів. Експортовані дані надсилаються на вказану користувачем пошту. Доступні формати: SHP, GeoJSON та SQL.
HDX (Humanitarian Data Exchange)	https://data.humdata.org/	Без обмежень	Ресурс для обміну «гуманітарними» гео- та статистичними даними усього світу, включаючи географічні карти, інфраструктуру, землеволодіння та ін. Доступні формати: GeoPackage, SHP, GeoJSON, CSV, GEOTIFF тощо.
Fao soils portal	https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/	Без обмежень	Портал, де наявні дані про ґрунти, світову карту ґрунтів та їх характеристики у форматі. Доступний експорт карти ґрунтів світу у вільному форматі SHP.
Public open data	https://public.opendatasoft.com/explore/?sort=modified	Експорт об'єктів в межах Європи	Публічні відкриті дані, зокрема по дорожній інфраструктурі та інших географічних об'єктах в Європі. Доступні формати: GeoPackage, SHP, GeoJSON, KML, GEOTIFF тощо
GADM	https://gadm.org/download_country.html	Без обмежень	Географічні адміністративні кордони країн, області, райони. Експорт доступний у наступних форматах: Geopackage, SHP, GeoJSON: level-0, level1, level2, KMZ: level-0, level1, level2
Simple Map	https://simplemaps.com/gis/country/ua	Експорт геоданих тільки в межах України	Географічні адміністративні кордони країн, області, райони тощо. Безкоштовна версія надає доступ для експорту геоданих стосовно лише України у форматах SHP та GeoJSON.
Visicom	https://visicomdata.com/samples?country=bd	Без обмежень	Геопросторові дані та інструменти для аналізу карт і міських територій у форматах: MapInfo (Mentum Planet, Vertical Mapper), GeoPackage, CAD, SHP. При зміні формату для експорту потрібно залишити запит на сайті.

Джерело: розроблено авторами.

Систематизація ресурсів з вільним доступом до геоданих була проведена з метою узагальнення інформації про доступні джерела геопросторових даних, що є основою для розробки БГД територіальних громад. Вивчення ресурсів і їхніх можливостей показало, що наявність різноманітних форматів даних, включно зі стандартними (SHP, GeoJSON, KML тощо), забезпечує гнучкість у використанні та експорту даних. Ліміти експорту в окремих ресурсах вимагають уважного вибору платформи для конкретного проєкту. Безкоштовний доступ до даних значно розширює можливості досліджень і впровадження геоінформаційних технологій у сферу управління територіями. Завдяки систематизації інформації, користувачі можуть швидко знайти відповідний ресурс для своїх задач, оцінити його функціонал і визначити, наскільки він підходить для інтеграції з наявними проєктами або створення нових. Це дослідження сприяє оптимізації процесів збору та обробки геопросторових даних, що, у свою чергу, підвищить ефективність роботи з розробки БГД у спеціалізованому програмному забезпеченні.

Для розробки та наповнення БГД територіальних громад оптимальними є використання таких ресурсів як: OpenStreetMap (OSM), Overpass Turbo та HDX. OSM забезпечує відкритий доступ до деталізованих геопросторових даних у форматі SHP, що підходить для створення базових шарів інфраструктури та природних об'єктів, а відкритий ресурс Overpass Turbo дозволяє виконувати точкові запити з високою вибірковістю даних у форматах GeoJSON, KML, що є ключовим для локальних потреб громад. У свою чергу HDX пропонує глобальні дані у форматах GeoJSON, CSV, GeoTIFF тощо, які можна використовувати для стратегічного планування та аналізу. Ці платформи забезпечують баланс між відкритістю, точністю та гнучкістю експорту даних, що робить їх універсальними для задач територіального управління та розвитку громад.

Вагомим аспектом для розуміння даної роботи є те, що для реального практичного використання усіх рекомендацій та розвитку даного напрямку у розрізі територіального планування, треба виокремити переваги та недоліки кожної категорії джерел вихідних даних (табл. 3). Таке співвідношення забезпечить фундаментально правильний підхід до розробки БГД, її подальшого наповнення та використання на місцевому рівні.

Таблиця 3 – Переваги та недоліки категорій джерел вихідних даних

Категорія	Переваги	Недоліки
1	2	3
1. Картографічні основи (базові карти)	- доступність широкого спектра масштабів та форматів; - високий рівень деталізації для різних територій; - можливість використання як базового шару для інших геоданих; - широке територіальне охоплення; - постійне оновлення даних (особливо OSM); - легкість інтеграції в ГІС-проєкти; - різноманітність стилів відображення.	- часто потребують оновлення через можливу застарілість даних; - можливі похибки у відображенні деталей через генералізацію; - ліцензійні обмеження на використання деяких картографічних матеріалів; - можлива неповнота даних для окремих територій; - залежність від інтернет-з'єднання; - обмеження на використання деяких джерел різна; - якість даних залежно від регіону.
2. Офіційна землевпорядна та містобудівна документація	- висока точність та офіційність даних; - відображення правового статусу земельних ділянок; - актуальність у контексті нормативно-правової бази; - юридична значущість та детальна інформація про землекористування актуальність для планування.	- складність доступу до деяких документів через бюрократичні обмеження; - можливі розбіжності між документами різних відомств; - обмежений обсяг просторової інформації в окремих випадках; - обмежений доступ до деяких документів; - застарілість даних; - складний процес отримання різних форматів даних.

Закінчення табл. 3

1	2	3
3. Супутникові знімки	-актуальність та висока деталізація зображень; -можливість отримання даних для важкодоступних територій; -широкий спектр застосувань у різних галузях (моніторинг, аналіз тощо); -актуальність відображення території та можливість зміни часового проміжку.	-висока вартість високоякісних знімків; -потреба у додатковій обробці для інтеграції в ГІС; -обмежена доступність через погодні умови та хмарність; -залежність від погодних умов; -значний обсяг даних потребує обробки; -обмеження на безкоштовне використання.
4. Висотні дані (DEM/HGT)	-необхідність для аналізу рельєфу та побудови 3D-моделей; -доступність даних з відкритих джерел (наприклад SRTM); -висока деталізація у локальних масштабах; -точна інформація про рельєф; -можливість 3D-моделювання; -глобальне покриття.	-низька точність у глобальних моделях. -складність обробки для великих територій; -обмеженість використання без спеціалізованого програмного забезпечення; -різна роздільна здатність, тому можливі помилки у даних.
5. Вебресурси з можливим експортом геоданих	-швидкий доступ до великого обсягу даних; -можливість експорту в різні формати для інтеграції в ГІС; -актуальність даних завдяки регулярному оновленню; -різноманітність форматів експорту; -оперативне оновлення; -легкість доступу та можливість вибору даних.	-неоднорідність формату даних; -залежність від інтернет-зв'язку; -можливі обмеження доступу до окремих ресурсів через політику конфіденційності; -залежність від роботи серверів обмеження на обсяг завантаження; -потреба в конвертації форматів.
6. Плагіни, які наявні у середовищі ГІС	-інтегрованість у робоче середовище ГІС; -простота використання для завантаження та обробки даних; -різноманітність функцій для аналізу та візуалізації; -зручність використання інтеграція з робочим середовищем; -автоматизація процесів; -розширені можливості обробки та додаткові інструменти.	-залежність від підтримки та оновлення плагінів; -можливі технічні проблеми при встановленні або використанні; -обмежена функціональність окремих плагінів; -залежність від версії ПЗ, тому можлива нестабільність роботи; -обмежена функціональність безкоштовних версій -потреба в навчанні користування.

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз кожної категорії джерел вихідних даних показує, що їх переваги та недоліки суттєво впливають на процес створення БГД. Таблиця 3 ілюструє ці аспекти, що дає можливість обґрунтовано підійти до вибору джерел для забезпечення актуальності, точності та ефективності геоінформаційних проєктів. Усі ці аспекти досліджуються через призму того, як можна правильно диференціювати категорії джерел вихідних даних.

Картографічні основи забезпечують широкий спектр масштабів, легкість інтеграції в ГІС-проєкти, але часто потребують оновлення та можуть бути залежними від регіональної специфіки. Офіційна землепорядна документація вирізняється високою точністю і юридичною значущістю, однак її отримання ускладнене бюрократичними процедурами. Супутникові знімки та висотні дані надають актуальну, деталізовану інформацію, що важливо для 3D-моделювання й моніторингу територій. Проте висока вартість і складність обробки є значними перешкодами. Вебресурси з експортом геоданих забезпечують доступ до великого обсягу даних у різних форматах, що спрощує інтеграцію в ГІС, але потребують стабільного інтернет-з'єднання та оновлення інформації. Плагіни ГІС значно розширюють функціональність для аналізу та автоматизації процесів, хоча залежність від оновлень і ліцензій може обмежувати їх використання.

Підсумовуючи, розуміння цих особливостей є критично важливим для створення якісних геоінформаційних продуктів у сфері управління територіями, планування та розвитку територіальних громад. Таким чином, лише комплексне використання цих джерел дозволяє досягти оптимального результату. Інтеграція різних категорій даних забезпечує точність, актуальність і універсальність баз геоданих, знижуючи ризики, пов'язані з обмеженнями кожного окремого джерела.

Висновок. У результаті проведеного дослідження розроблено структуровану систему пошуку та класифікації джерел відкритих геопросторових даних, що дозволяє оптимізувати процес формування бази геопросторових даних територіальної громади. Запропонована класифікація за шістьма основними категоріями (картографічні основи, офіційна документація, супутникові знімки, висотні дані, веб-ресурси та плагіни ГІС) забезпечує комплексний підхід до збору та систематизації геопросторової інформації.

Систематизовано та проаналізовано можливості використання різних типів відкритих джерел геопросторових даних для потреб територіальних громад України. Проведений порівняльний аналіз функціональних можливостей картографічних сервісів та ресурсів з вільним доступом до геоданих дозволив визначити оптимальні шляхи їх застосування при формуванні БГД територіальної громади. Картографічні сервіси, наприклад OpenStreetMap, завдяки частому оновленню та експорту в GeoJSON, KML, SHP, є ефективними для створення базових шарів, незважаючи на обмеження (до 50 000 об'єктів) та варіативну точність (1–15 м). Супутникові знімки, такі як Sentinel-2 та Landsat, забезпечують високу деталізацію і моніторинг змін у часі, хоча потребують попередньої обробки. Веб-ресурси з доступним експортом Overpass Turbo та HDX, пропонують великий обсяг даних у зручних форматах для інтеграції, а додаткові плагіни, зокрема QuickOSM та Kadastr Live, автоматизують процес обробки та оновлення інформації. Висотні дані (DEM) з відкритого джерела Earth Data Search дозволяють здійснювати детальний просторовий аналіз, а офіційна землевпорядна та містобудівна документації забезпечують правове обґрунтування та високу достовірність даних. Такий підхід до наповнення БГД забезпечує точність, актуальність і правове узгодження геопросторових даних.

Розроблена система класифікації оптимізує процес пошуку та обробки необхідних даних, що значно підвищує ефективність формування БГД територіальної громади. Комплексний аналіз особливостей кожної категорії джерел даних, включаючи можливості їх конвертації та інтеграції у сучасні ГІС-системи, забезпечує обґрунтований вибір інструментів для конкретних завдань громади. Інтеграція різноманітних джерел геопросторових даних є необхідною умовою для досягнення високої точності та максимального результату при формуванні бази геоданих територіальної громади. Оскільки кожне джерело має свої специфічні характеристики, такі як точність, рівень деталізації, обмеження у форматах або частоті оновлення, їх комплексне використання дозволяє значно знизити вплив обмежень кожного окремого джерела та забезпечити повноцінне та актуальне представлення просторової інформації.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку алгоритмів автоматизованого збору даних з відкритих джерел, створення методики оцінювання актуальності отриманої інформації, вивчення можливостей інтеграції з системами електронного врядування територіальних громад та з інноваційними технологіями, такими як штучний інтелект, для автоматизації аналізу геопросторових даних. Практична реалізація запропонованих рекомендацій сприятиме підвищенню ефективності управління територіями громад, оптимізації процесів просторового планування та створенню сучасної інформаційної інфраструктури для сталого розвитку України.

Список використаних джерел

1. Карпінський, Ю.О., Лященко, А.А., Лазоренко, Н.Ю., Кінь, Д.О. (2024). Особливості роботи з геопросторовими даними громад для сталого розвитку їх територій. *Land & property development: innovations and transformations : 3rd International Scientific and Practical Conference* (с. 40-42). Київ. нац. ун-т буд. та арх. <https://repository.knuba.edu.ua/items/c8caf1e5-50b1-48f7-bc92-0f0be04234f6>.
2. Про затвердження структури Баз геоданих містобудівної документації на місцевому рівні, Наказ Міністерства розвитку громад та територій України № 56 від 22.02.2022 р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0432-22#Text>.
3. Залізецький, В.В., Черняк О.І. (2019). Аналіз функціональних можливостей популярних картографічних сервісів. *Актуальні проблеми розвитку науки в контексті глобальних трансформацій інформаційного суспільства* : матеріали II Міжнародн. наук.-практ. конф. (с. 148-152). <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/26607>.
4. Bhunia, G.S., Shit, P.K., Sengupta, D. (2020). Free-open access to geospatial data and tools for forest resources management. *Spatial modeling in forest resources management: rural livelihood and sustainable development*, 78, 651-675. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-56542-8_28.
5. Dolder, D., Williams, G.P., Miller, A.W., Nelson, E.J., Jones, N.L., Ames, D.P. (2021). Introducing an open-source regional water quality data viewer tool to support research data access. *Hydrology*, 8(2), 91. <https://doi.org/10.3390/hydrology8020091>.
6. Chen, J., Chen, S., Fu, R., Li, D., Jiang, H. (2022). Remote sensing of big data for water environment monitoring: current status, challenges, and future prospects. *Earth's Future*, 10(2), e2021EF002289. <https://doi.org/10.1029/2021EF002289>.
7. Kalyvas, C., Kokkos, A., Tzouramanis, T. (2017). A survey of official online sources of high-quality free-of-charge geospatial data for maritime geographic information systems applications. *Information Systems*, 65, 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.is.2016.11.002>.
8. Кононюк, О.О., Різдваєцька, Я.І. (2022). Про можливості використання відкритих геоданих в ГІС режиму ґрунтової вологості. *Ґрунтові води* : матеріали наук.-практ. конф. (с. 27-30). Дніпровськ. держ. агр.-екон. ун-т.
9. Usery, E.L., Varanka, D.E., Davis, L.R. (2018). Topographic mapping evolution: From field and photographically collected data to GIS production and linked open data. *The Cartographic Journal*, 55(4), 378-390. <https://doi.org/10.1080/00087041.2018.1539555>.
10. Ресурси для пошуку та використання супутникових зображень. (б.д.). *Global Investigative Journalism Network*. <https://gijn.org/ua/resurs-ua/resursi-dla-posuku-ta-vikoristanna-suputnikovih-zobrazhen>.
11. Карпінський, Ю., Лазоренко-Гевель, Н. (2018). Методи збирання геопросторових даних для топографічного картографування. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 35(1), 204-211.
12. OpenStreetMap. (n.d). <https://www.openstreetmap.org/#map=13/49.57789/34.40412>.
13. GIS Data. (n.d). Center for International Development. <https://cid.center/gisdata>.
14. Overpass Turbo. (n.d). <https://overpass-turbo.eu/>.
15. BBBike Extract Service. (n.d). BBBike.org. <https://extract.bbbike.org>.
16. Humanitarian Data Exchange. (n.d). OCHA. <https://data.humdata.org>.
17. FAO/UNESCO Soil Map of the World. (n.d). FAO Soils Portal. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faunesco-soil-map-of-the-world/en>.
18. Public Open Data. (n.d). OpenDataSoft. <https://public.opendatasoft.com/explore/?sort=modified>.
19. GADM Data. (n.d). GADM. https://gadm.org/download_country.html.
20. Simple Maps GIS Data. [(n.d). Simple Maps. <https://simplemaps.com/gis/country/ua>.
21. Visicom Data Samples. (n.d). Visicom. <https://visicomdata.com/samples?country=bd>.

References

1. Karpinskyi, Yu.O., Liashchenko, A.A., Lazorenko, N.Yu., & Kin, D.O. (2024). Osoblyvosti roboty z heoprostorovymy daniamy hromad dlia staloho rozvytku yikh terytorii [Features of working with geospatial data of communities for sustainable development of their territories]. *3rd International Scientific and Practical Conference "Land & property development: innovations and transformations"*, Kyiv National University of Construction and Architecture (pp. 40–42). <https://repository.knuba.edu.ua/items/c8caf1e5-50b1-48f7-bc92-0f0be04234f6>.

2. Pro zatverdzhennia struktury Bazy heodanykh mistobudivnoi dokumentatsii na mistsevomu rivni [Approval of the structure of the Geodatabase of urban planning documentation at the local level], Order of the Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine No. 56 of 22.02.2022. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0432-22#Text>.

3. Zalizetskyi, V.V., & Chernyak, O.I. (2019). Analiz funktsionalnykh mozhlyvostei populiarnykh kartohrafichnykh servisi [Analysis of the functional capabilities of popular mapping services]. *2nd International Scientific-Practical Conference "Current problems of science development in the context of global transformations of the information society"* (pp. 148–152). Institute of Innovative Education. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/26607>.

4. Bhunia, G.S., Shit, P.K., & Sengupta, D. (2020). Free-open access to geospatial data and tools for forest resources management. *Spatial modeling in forest resources management: Rural livelihood and sustainable development*, 78, 651–675. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-56542-8_28.

5. Dolder, D., Williams, G. P., Miller, A. W., Nelson, E. J., Jones, N. L., & Ames, D. P. (2021). Introducing an open-source regional water quality data viewer tool to support research data access. *Hydrology*, 8(2), 91. <https://doi.org/10.3390/hydrology8020091>.

6. Chen, J., Chen, S., Fu, R., Li, D., Jiang, H., Wang, C., & Hicks, B. J. (2022). Remote sensing big data for water environment monitoring: current status, challenges, and future prospects. *Earth's Future*, 10(2), e2021EF002289. <https://doi.org/10.1029/2021EF002289>.

7. Kalyvas, C., Kokkos, A., & Tzouramanis, T. (2017). A survey of official online sources of high-quality free-of-charge geospatial data for maritime geographic information systems applications. *Information Systems*, 65, 36–51. <https://doi.org/10.1016/j.is.2016.11.002>.

8. Kononyuk, O. O., & Rizdvanetska, Ya. I. (2022). Pro mozhlyvist vykorystannia vidkrytykh heodanykh v HIS rezhymu gruntovoi volohy [On the possibility of using open geodata in GIS mode of soil moisture]. *Scientific-practical conference "Groundwater"* (pp. 27–30). Dnipro State Agrarian and Economic University.

9. Usery, E.L., Varanka, D.E., & Davis, L.R. (2018). Topographic mapping evolution: From field and photographically collected data to GIS production and linked open data. *The Cartographic Journal*, 55(4), 378–390. <https://doi.org/10.1080/00087041.2018.1539555>.

10. Resursy dlia poshuku ta vykorystannia suputnykovykh zobrazhen [Resources for searching and using satellite images]. (2023). Global Investigative Journalism Network. <https://gijn.org/ua/resurs-ua/resursi-dla-posuku-ta-vikoristanna-suputnikovih-zobrazhen/>.

11. Karpinskyi, Yu., & Lazorenko-Hevel, N. (2018). Metody zbyrannia heoprosorovykh danykh dlia topohrafichnoho kartohrafuvannia [Methods of collecting geospatial data for topographic mapping]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Modern Achievements of Geodetic Science and Production*, 35(1), 204–211.

12. OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/#map=13/49.57789/34.40412>.

13. GIS Data. <https://cid.center/gisdata/>.

14. Overpass Turbo. <https://overpass-turbo.eu/>.

15. BBBike Extract Service. <https://extract.bbbike.org/>.

16. Humanitarian Data Exchange. <https://data.humdata.org/>.

17. FAO/UNESCO Soil Map of the World. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/>.

18. Public Open Data. <https://public.opendatasoft.com/explore/?sort=modified>.

19. GADM Data. https://gadm.org/download_country.html.

20. Simple Maps GIS Data. <https://simplemaps.com/gis/country/ua>.

21. Visicom Data Samples. <https://visicomdata.com/samples?country=bd>.

Отримано 28.01.2025

Inna Gamayun¹, Maryna Pilicheva²

¹Master's Student, 1st year, Department of Land Administration and Geoinformation Systems
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: innavl2002@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8730-1580>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: maryna.pilicheva@kname.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1733-7534>

Scopus Author ID: 57215290310, Researcher ID: ABG-5067-2020

ANALYSIS OF POTENTIAL FOR UTILIZING OPEN SOURCE DATA IN DEVELOPING THE GEOSPATIAL DATABASE FOR TERRITORIAL COMMUNITIES

The research addresses pressing issue of providing Ukrainian territorial communities with reliable geospatial information amid active digital transformation. This scientific work is driven by contemporary decentralization challenges and the need to integrate diverse data types for effective territorial management.

The primary research challenge lies in the lack of reliable methodology and verified information for establishing the geospatial database. The study aims to develop the structured system for searching, classifying, and analyzing open geospatial data sources, considering modern requirements for information relevance, accuracy, and accessibility.

Given the versatility of geoinformation technologies, the research methodology includes the comprehensive analysis of various sources of open data: cartographic bases, official documentation, satellite images, elevation data, web resources and GIS plug-ins. The comparative analysis of cartographic services and geospatial data resources was conducted to determine optimal integration strategies. The findings revealed that OpenStreetMap (OSM) or ESRI Standard Map cartographic bases are most suitable for developing territorial communities' geodatabases, ensuring data currency and high accuracy. The study identified GeoJSON, KML (XML), SHP, and GDB as the most prevalent geodata export formats, with OSM and Overpass turbo emerging as the most effective export resources, offering user-friendly interfaces and frequent updates (3-6 months) with accuracy ranging from 1-15 meters depending on the terrain.

The key research outcomes include developing the six-category classification system for geospatial data sources, enabling the comprehensive approach to gathering and systematizing geospatial information. The study systematized and analyzed potential applications of various open geospatial data sources for needs of Ukrainian territorial communities. Maximum accuracy and effectiveness can be achieved through comprehensive integration of all six geospatial data source categories. This approach ensures necessary information detail for effective management of the territorial community development. Consolidation of heterogeneous geospatial sources facilitates digital transformation, minimizes data limitation risks, and ensures reliability of geodatabases as the foundation for sustainable territorial development.

The research conclusions emphasize potential for optimizing data collection and processing procedures, significantly enhancing efficiency of geospatial database formation. Directions of future research are proposed, including, namely: development of automated data collection algorithms, assessment methodologies of information currency, integration with territorial governance systems, and innovative technologies. Practical significance lies in improving territorial management, optimizing spatial planning processes, and establishing modern information infrastructure for Ukraine's sustainable development.

Keywords: geospatial database; geoinformation systems; territorial community; open data; map service; data integration.

Fig.: 1. Table: 3. References: 21.

До 65-річчя Національного університету «Чернігівська політехніка»

У 2025 році Національний університет «Чернігівська політехніка» відзначає 65-річчя з дня заснування. Цей ювілей символізує послідовний розвиток інженерної освіти, технічної науки та дослідницької діяльності. Одним із вагомих досягнень у науковій сфері стало створення фахового наукового журналу **«Технічні науки та технології»**, який став відкритою платформою для обміну досвідом, апробації результатів досліджень і популяризації досягнень технічної науки.

Історія журналу бере свій початок з попередника — **«Вісника Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки»**, зареєстрованого у 1996 році, який протягом багатьох років був основним науковим виданням університету. Саме на його основі та за підтримки наукової спільноти у 2013 році було засновано нове фахове видання – **Науковий журнал «Технічні науки та технології»**.

Новий формат видання був обумовлений не лише змінами вимог щодо наукових фахових видань України, але й запроваджував перехід на сучасні міжнародні стандарти оформлення наукових робіт з дотриманням принципів академічної доброчесності та прозорості. Наразі він передбачає: систему «сліпого» рецензування; присвоєння DOI; цифровий архів, розташований на сайті журналу (<http://tst.stu.cn.ua/>); індексацію [Google Scholar](#), [Наукова періодика України](#) (Національна бібліотека України ім. В. І. Вернадського), [Index Copernicus](#) (оцінка ICV 2019 = 55.41, ICV 2021 = 69.37), [Уран](#), [ResearchBib](#), [BASE](#), [CrossRef](#), [Open Ukrainian Citation Index](#), [The Lens](#).

Від початку свого існування видання орієнтоване на публікацію результатів наукових досліджень у таких галузях знань, як прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування, інформаційно-комп'ютерні технології, енергетика, електротехніка та електромеханіка, хімічні та харчові технології, будівництво та геодезія. Його включено до Переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2019 р. № 975 (зі змінами від 09.02.2021 р. № 157), відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

Журнал друкується за рішенням Вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка». До складу редакційної колегії входять провідні вчені з України, Польщі, Словаччини, Литви, Румунії, Азербайджану, що забезпечує високий рівень наукової експертизи та міжнародного обміну. Журнал надає публікації українською та англійською мовами та функціонує у форматі відкритого доступу. З моменту започаткування вже здійснено 39 випусків журналу, які відбуваються 4 рази на рік.

Завдяки активності авторів публікацій, досвідченості рецензентів, наполегливої праці колективів редколегії та видавництва Науковий журнал «Технічні науки та технології» є не лише важливим елементом інфраструктури університетської науки, а й надійним інструментом розвитку технічної думки, платформою для формування наукової культури нових поколінь інженерів, дослідників і викладачів.

Редакційна колегія наукового журналу “Технічні науки та технології”

**ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ
НАУКОВИХ СТАТЕЙ ДО НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ
«ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**

Шановні дописувачі!

Для подання статті необхідно спочатку надіслати статтю та інформацію про автора, з яким контактувати щодо публікації статті, оформлені за встановленими вимогами, для попереднього розгляду редакційною колегією журналу «Технічні науки та технології». За умови відповідності статті спеціальностям, за якими акредитовано журнал, відповідності нормам академічної доброчесності за результатами перевірки на плагіат, позитивної незалежної рецензії від призначеного редакційною колегією рецензента, стаття розміщується в макеті журналу.

Редакційна колегія забезпечує розгляд та незалежне рецензування поданих до публікації матеріалів вченими, які мають науковий ступінь та здійснюють дослідження за спеціальністю, що відповідає тематиці поданого для публікації матеріалу, і є авторами (спів-авторами) загальною кількістю не менше трьох публікацій у наукових виданнях, включених до категорії «А» та/або категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, та/або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus за відповідною спеціальністю, оприлюднених упродовж останніх п'яти років.

Опублікування наукових статей у журналі «Технічні науки та технології» є платним. Вартість публікації наукової статті становить:

- **80 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам потрібна паперова версія журналу);
- **60 грн/1 сторінка** (за умови, якщо авторам достатньо електронної версії журналу).

Остаточна вартість публікації формується після готовності електронного макету журналу та повідомляється автору, відповідальному за публікацію статті. Оплата підтверджується квитанцією.

**УМОВИ ПУБЛІКАЦІЇ, ВИМОГИ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ, РЕКВІЗИТИ
ОПЛАТИ ТА ОСТАННІ НОМЕРИ НАУКОВОГО ЖУРНАЛУ «ТЕХНІЧНІ НАУКИ
ТА ТЕХНОЛОГІЇ» РОЗМІЩЕНО НА САЙТІ»: <http://tst.stu.cn.ua/>**

Контактна інформація:

Мороз Наталія Вікторівна

Тел.: (0462) 665-225

E-mail: tst.technical.sj@gmail.com

**Відповідальність за матеріали, наведені у статті, несе автор.
Неправильно оформлені автором стаття та супровідні документи,
що не відповідають зазначеним вимогам, розглядатися не будуть.**

*Редакція розглядає надходження публікації та супровідних документів
як згоду дописувача (ів) щодо передачі авторського права на використання твору
(тиражування, розповсюдження тощо).*

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 1(39)

Технічний редактор, відповідальна за випуск
Редактор
Комп'ютерна верстка

Н. В. Мороз
О. С. Смелова
О. П. Журко

Заснований у 2015 році. Ідентифікатор медіа
відповідно до Реєстру суб'єктів у сфері медіа від 31.08.2023 р. № 782 R30-01210

Підписано до друку 02.04.2025. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 43,94.
Тираж 100 пр. Замовлення № 06/25.

Редакційно-видавничий відділ
Національного університету «Чернігівська політехніка»
14030, Україна, м. Чернігів, вул. Шевченка, 95.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК № 7128 від 18.08.2020 р.