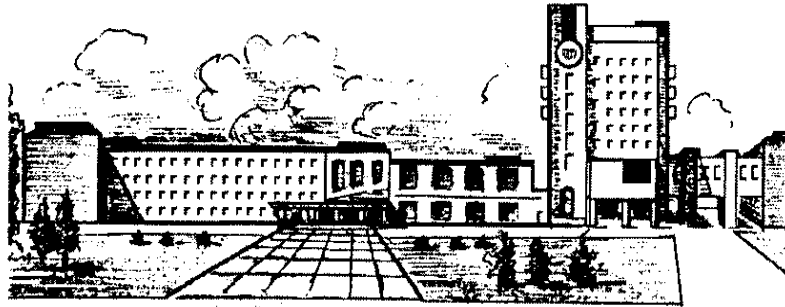


ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 4(38)

Чернігів 2024

УДК 62:67.05

T38

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-4(38)

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 13 від 23.12.2024 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», 2024. – № 4(38). – 368 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. С., 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 Bembenek, 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 О. 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;

Трус 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

Білик 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;

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

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

Сахно С. 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;

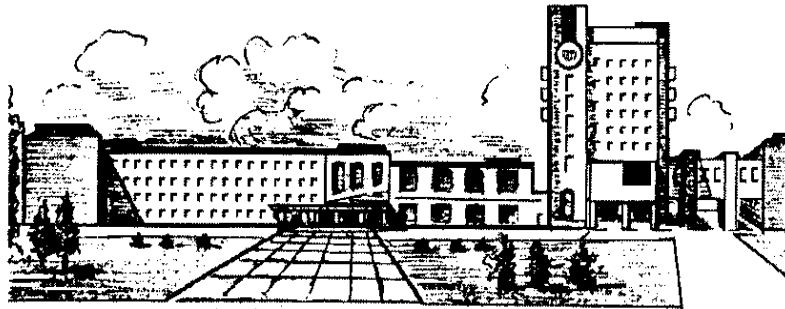
Юрченко В. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури.

© НУ «Чернігівська політехніка», 2024



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

ISSUE № 4(38)

Chernihiv 2024

UDC 62:67.05

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-4(38)

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, 2024. – № 4(38). – 368 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;

Dmytriiiev 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;

Tsitsiura 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.

© Chernihiv Polytechnic National University, 2024



ЗМІСТ

РОЗДІЛ I. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

<i>Луців І. В.</i> Сучасні підходи до торцевого фрезерування важкооброблюваних матеріалів при застосуванні ПКНБ.....	9
<i>Майборода В. С., Буріков О. О.</i> Магнітно-абразивне оброблення плоских поверхонь феромагнітних деталей торцевими головками на базі високоенергетичних магнітів	16
<i>Кальченко В. В., Венжега В. І., Пасов Г. В., Кологойда А. В., Завертанний Б. С., Кузьмелний Я. В.</i> Сучасні методи та інструмент для підвищення ефективності шліфування.....	22
<i>Гречка А. І., Пузирьов О. Л.</i> Оптимізація виробництва через технологію холодного видавлювання для підвищення якості продукції.....	31
<i>Завертанний Б. С., Пасов Г. В., Завертанний М. С., Венжега В. І., Мурашківська В. П.</i> Експериментальне дослідження процесу розтягу полімерних оболонок та моделювання процесу методом скінчених елементів.....	37
<i>Корбут Є., Парненко В. С., Ніколаєнко Т., Даниленко О.</i> Архітектура дискретного покриття робочих поверхонь інструменту для різних схем різання.	44
<i>Олексієнко С. В., Руденко М. М., Ющенко С. М., Болотов М. Г., Корзаченко М. М.</i> CAE-аналіз експлуатації зварної двотаврової колони з регульованим полем залишкових напружень у її перерізі.....	57
<i>Ivanko A., Zenkin M., Chernysh M., Kolinko I.</i> Improvement of the pneumatic drive of a flat die-cutting press	70
<i>Кравець В. О., Кравець О. М., Лапковський С. В., Фролов В. К., Сапон С. П., Приходько В. П.</i> Використання методу аналогій при проектуванні адаптивних захватних пристроїв	80
<i>Петров О. Д.</i> Забезпечення якості отворів в деталях з полімерних композитних матеріалів свердлами з модифікованими робочими поверхнями.....	92
<i>Радкевич С. І., Луців І. В.</i> Залежність залишкових напружень в поверхні виробу від умов різання при торцевому фрезеруванні.....	103
<i>Щербань А. Е., Вовк В. В., Майданюк С. В., Бесарабець Ю. Й.</i> Спрощення при аналізі складальних одиниць та автоматизація роботи з ними.	112
<i>Шкрабова А. В., Казарін Д. В., Майданюк С. В., Вовк В. В., Бесарабець Ю. Й.</i> Пристрій для загострення дискових закрійних ножів.	120
<i>Радкевич С. І., Залога В. О.</i> Особливості процесу торцевого фрезерування з використанням інструментів з кубічного нітриду бору.	128

РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Казимир В. В., Роговенко А. І., Карась О. О.</i> Використання штучних нейронних мереж для аудіо класифікації на мінікомп'ютерній платформі.	134
<i>Красножон О. В., Красножон А. В., Димерець А. В., Сигута А. В.</i> Комп'ютерна модель виявлення металевих предметів за допомогою металошукача індуктивного типу.	150
<i>Левківський В. Л., Марчук Г. В., Москалик О. С.</i> Модель ігрового штучного інтелекту для некерованого гравцем персонажу.....	163
<i>Байда В. Д., Велигорський О. А.</i> Методика порівняння інформаційних технологій побудови дистанційних лабораторій апаратного забезпечення.....	172
<i>Кузьменко Д. В.</i> Методи та моделі емуляції негативних впливів на ресурси інформаційних систем.	189
<i>Насенок К. О., Войцеховська М. М.</i> Проблематика клієнтського рендерингу в сучасній всесвітній мережі.....	197
<i>Полевод О. М.</i> Клептографія у контексті захисту інформації. Класифікація клептографічних атак.....	208

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Полоз О. Ю., Ебіч Ю. Р.</i> Металоєпоксидні композиції для виробництва вулканізаційних прес-форм.....	214
<i>Волкова Р. М.</i> Дослідження якісних показників консервованої ікри з кабачків із додаванням червоного болгарського перцю.....	222
<i>Шліхтер О. І., Косогіна І. В., Косогін О. В.</i> Моніторинг якості води в Україні та вплив війни на її якість.....	234

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

<i>Стрункін Г.М.</i> Автономна вітроенергетична установка з аеродинамічним мультиплікуванням на базі асинхронного генератора з фазним ротором зі збудженням від інвертора напруги.....	245
<i>Зайцев С. В., Кишневський В. П.</i> Процесний підхід до діагностування технологічних середовищ оливнонаповненого обладнання атомної електростанції.....	254
<i>Клюєв О. В., Садовой О. В., Сохіна Ю. В.</i> Бездатчикова система керування машиною подвійного живлення на основі фільтра Калмана.....	270
<i>Voytenko, V., Solodchuk, M.</i> Software and hardware complex for experimental study of two-coordinate positioning system of auxiliary UAV video camera.....	282

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

<i>Максим'юк Ю., Авдійчук О., Лук'янчук Д.</i> Технічні аспекти забезпечення сейсмічної стійкості сучасних конструкцій.....	292
<i>Бердник О. Ю., Виговський С. В.</i> Використання тонкодисперсного склопорошку як часткова заміна цементу та вплив його на міцнісні характеристики бетону.....	306
<i>Герасимчук О. Л., Гой В. В., Харів В. В.</i> Використання сучасних геодезичних технологій для проведення оцінки земельних ресурсів у віддалених районах.....	313
<i>Кірейцева Г. В., Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Гнітецький О. М., Хоменко С. В.</i> Комплексний підхід до інтеграції водоохоронних зон у геоінформаційні системи міських кадастрів.....	325
<i>Ворох В. В., Зацерковний В.</i> Використання безпілотних літальних апаратів в задачах прецизійного землеробства.....	336
<i>Цвик О. В., Кравченя В. М.</i> Топографо-геодезичне забезпечення оцінки технічного стану доріг, пошкоджених внаслідок військової агресії.....	350
<i>Герба О. В.</i> Дослідження енергетичних характеристик спіралеподібних турбін для систем охолодження ядерних установок.....	359
ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ	367

CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE
AND MACHINE BUILDING

<i>Lutsiv I.</i> Modern approaches to face milling of hard-to-machine materials using PCBN tools.....	9
<i>Maiboroda V., Burikov O.</i> Magnetic-abrasive treatment of flat surfaces of ferromagnetic parts with end heads based on high-energy magnets	16
<i>Kalchenko V., Venzhega V., Pasov H., Kolohoida A., Kuzhelnyi Y., Bogoslavskij V.</i> Modern methods and tools for improving grinding efficiency.....	22
<i>Hrechka A., Puzyrov O.</i> Optimization of production through cold extrusion technology to improve product quality	31
<i>Zavertannyi B., Pasov G., Zaveretannyi M., Venzheha V., Murashkovska V.</i> Experimental study and finite element modeling of tensile deformation in polymer shells.....	37
<i>Korbut Ie., Parnenko V., Nikolaienko T., Danylenko O.</i> The location of discrete areas of coat with globular structure on the tool surfaces with different cutting schemes	44
<i>Oleksiienko S., Rudenko M., Yushchenko S., Bolotov M., Korzachenko M.</i> CAE Analysis of exploitation of I-beam column with the regulated field of residual stresses in its cross-section	57
<i>Ivanko A., Zenkin M., Chernysh M., Kolinko I.</i> Improvement of the pneumatic drive of a flat die-cutting press	70
<i>Kravets V., Kravets O., Lapkovsky S., Frolov V., Sapon S., Prykhodko V.</i> Using the method of analogies in designing an adaptive grippers.....	80
<i>Petrov O.</i> Ensuring the quality of holes in parts made of polymer composite materials with drills with modified working surfaces.....	92
<i>Radkevych S., Lutsiv I.</i> Dependence of residual stresses in the workpiece surface on cutting conditions during face milling	103
<i>Shcherban A., Vovk V., Maidaniuk S., Besarabets Y.</i> Simplification in the analysis of component units and automation of working with them.....	112
<i>Shkrabova A., Kazarin D., Maidaniuk S., Vovk V., Besarabets Y.</i> Disc knife sharpening device for cutting knives	120
<i>Radkevych S., Zaloga W.</i> Features of the face milling process using cubic boron nitride tools.....	128

SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

<i>Kazymyr V., Rohovenko A., Karas O.</i> Application of Artificial Neural Networks for Audio Classification on an Embedded Platform.....	134
<i>Krasnozhon O., Krasnozhon A., Dymereys A., Syguta A.</i> Computer model for detecting the metal objects with induction metal detector	150
<i>Levkivskiy V., Marchuk G., Moskalyk O.</i> Game artificial intelligence model for non-playable characters.....	163
<i>Baida V., Velihorskyi O.</i> Methodology for comparison of information technologies for development of remote hardware laboratories.....	172
<i>Kuzmenko D.</i> Methods and models for emulating negative impacts on information system resources.....	189
<i>Nasenok K., Voitsekhovska M.</i> Client-side rendering issues in the modern worldwide network.....	197
<i>Polevod O.</i> Kleptography in information security context. Classification of kleptographic attacks	208

SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

<i>Poloz O., Ebich Yu.</i> Metal epoxy composite for the production of vulcanizing press-molds	214
---	-----

Volkova R. Study of quality indicators of zucchini caviar with the addition of red bulgarian pepper 222

Shlikhter O., Kosogina I., Kosohin O. Monitoring of water quality in Ukraine and the impact of the war on its quality 234

SECTION IV. ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

Strunkin H. Autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on asynchronous generator with a phase rotor with excitation from a voltage-source inverter 245

Zaitsev S., Kishnevskiy V. Process approach to diagnostics of process media of oil-filled equipment of a nuclear power plant 254

Kliuiev O., Sadovoi O., Sokhina Yu. Sensorless control system by doubly fed machine on based the Kalman filter..... 270

Voytenko, V., Solodchuk, M. Software and hardware complex for experimental study of two-coordinate positioning system of auxiliary UAV video camera..... 282

SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

Maksymiuk Yu., Avdiichuk O., Lukianchuk D. Technical aspects of ensuring seismic stability of modern structures 292

Berdnyk O., Vyhovskyi S. Use of fine glass powder as a partial cement substitute and its effect on concrete strength characteristics 306

Herasymchuk O., Hoy V., Khariv V. Using modern geodesic technologies for land resources assessment in remote areas..... 313

Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Hnitetskyi O., Khomenko S. A comprehensive approach to integrating water protection zones into urban cadastral geoinformation systems 325

Vorokh V., Zatserkovnyi V. Use of unmanned aerial vehicles in precision agriculture 336

Tsvyk O., Kravchenia V. Topographic and geodetic support for assessing the technical condition of roads damaged as a result of military aggression..... 350

Herba O. Spiral turbines in nuclear facility cooling systems 359

BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES..... 367

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-4(38)-9-15

УДК 621.9

Ігор Володимирович Луців

доктор технічних наук, професор кафедри механічної інженерії
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: kmi_liv@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3980-428X>

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ПКНБ

У статті розглянуто інноваційні методи та технології торцевого фрезерування важкооброблюваних матеріалів за допомогою застосування інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору (ПКНБ). Особливу увагу приділено аналізу ефективності та довговічності ріжучих інструментів, що оснащені пластинами із надтвердих матеріалів, а також вирішенню питань з оптимізації процесу фрезерування для досягнення високої якості та точності обробленої поверхні. Розглянуто вплив різних технологічних параметрів на стабільність та продуктивність фрезерування, а також характеристики зношування ріжучих елементів інструменту. Особливу увагу приділено порівнянню властивостей та характеристик інструментального матеріалу, зокрема ПКНБ з традиційними матеріалами ріжучих інструментів, демонструючи переваги у використанні ПКНБ для обробки важкооброблюваних матеріалів. Висвітлені результати аналітичних досліджень показують переваги використання інструментів із ПКНБ у порівнянні з іншими інструментальними матеріалами ріжучих інструментів. Представлено рекомендації щодо вибору оптимальних режимів різання для підвищення продуктивності виготовлення деталей машин та економічної ефективності машинобудівного виробництва.

Ключові слова: торцеве фрезерування; полікристалічний кубічний нітрид бору; важкооброблюваний матеріал; зносостійкість; режимі різання.

Рис.: 1. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Сучасні галузі, такі як машинобудівна, оборонна, автомобільна, енергетична, вимагають використання матеріалів з високими фізико-механічними властивостями. Обробка таких матеріалів є складним завданням, що вимагає впровадження інноваційних підходів та застосування вискоелективних інструментів.

Використання інструментів із ПКНБ дозволяє значно підвищити продуктивність та якість обробки, зменшуючи зношування інструментів і покращуючи економічну ефективність виробничих процесів. Це особливо важливо в умовах сучасного промислового конкурентного ринку, де кожне підприємство прагне знизити виробничі витрати. Визначення механізмів зношування та впливу різних параметрів обробки на стабільність процесу є важливим науковим завданням. Отримані результати можуть слугувати базою для подальших досліджень і розвитку нових теорій у галузі механічної інженерії. Таким чином, проведення досліджень за цим технічним напрямком має велике значення для наукового та технічного прогресу, забезпечення високої якості продукції та підвищення ефективності виробничих технологічних процесів.

Постановка проблеми. Торцеве фрезерування важкооброблюваних матеріалів являє собою складну задачу для сучасного машинобудування та промисловості в цілому. Поява нових матеріалів з високою твердістю, міцністю та жаростійкістю, таких як суперсплави, титанові та нікелеві сплави, значно ускладнила процес їх обробки традиційними методами. Заміна стандартних ріжучих інструментів на інструменти з полікристалічного кубічного нітриду бору може значно підвищити продуктивність та якість обробленої поверхні виробів. Оптимальний вибір параметрів обробки, таких як швидкість різання, подача, глибина різання та наявність охолодження, є ключовим для забезпечення ефективності процесу. Недостатня оптимізація цих параметрів може призвести до зниження якості та підвищення зношування інструменту, що є основною задачею для встановлення умов оброблення важкооброблюваних матеріалів високої твердості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вітчизняними та зарубіжними авторами встановлено високу ефективність застосування такого надтвердого матеріалу, як ПКНБ різних груп (з різним вмістом кубічного нітриду бору), що базується в промисловій галузі, де оброблюються важкооброблювані матеріали при чистовій та напівчистовій обробці. Важкооброблюваний матеріал, зокрема і леговані сталі високої твердості, після загартування можуть досягати твердості до 65 HRC [1-5]. У багатьох випадках чистова обробка таких матеріалів може давати можливість відмовитися від операцій шліфування.

Авторами [10; 11; 12] встановлено, що інструмент із ПКНБ групи BL має збільшене зношування по задній поверхні при важкому переривчастому різанні, у той час як інструменти з матеріалами групи VN менш сприятливі до динамічних навантажень, але швидше зношуються при високошвидкісному різанні.

У статті [13] досліджувалися механізми зношування та характер поведінки інструменту з матеріалами груп BL і VN при різних умовах різання. Обробляли заготовки із загартованої сталі AISI 4340 (52 HRC) у станах, що забезпечують умови безперервного різання, незначних динамічних навантажень та різанні з ударом. Використовувався інструмент з композитами, що містять 50 % cBN у зв'язці TiC, 65 % cBN у зв'язці TiCN та 90 % cBN у зв'язці Co-Ni.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Обробка загартованих сталей інструментом із кубічного нітриду бору (КНБ) зазвичай проводиться шляхом точіння. Це поширене явище завдяки високій ефективності та точності процесу. Водночас торцеве фрезерування загартованих сталей залишається менш досліджуваною галуззю, що створює необхідність проведення подальших досліджень для оптимізації цього процесу, визначення критерію ефективності якості поверхонь, що отримуються шляхом механічної обробки.

Метою статті є теоретичний аналіз сучасних підходів до торцевого фрезерування важкооброблюваних матеріалів із використанням інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору, визначення оптимальних параметрів обробки для підвищення ефективності та економічної доцільності технологічного процесу, а також дослідження впливу параметрів різання на якість обробленої поверхні виробів деталей машин і механізмів.

Постановка завдання. Розробити теоретичні моделі для подальшого проведення експериментальних досліджень, сформулювати рекомендації щодо оптимізації процесу фрезерування загартованих сталей інструментом з ПКНБ для підвищення ефективності, зменшення зносу інструменту та покращення якості обробки.

Методика досліджень. Розглянуто застосування ріжучого інструменту із ПКНБ для обробки загартованої сталі високої твердості. Аналіз проблеми оброблюваності матеріалу дає змогу поставити задачу, оцінити вплив різних умов різання на ефективність процесу фрезерування. Розробка теоретичних моделей дасть змогу оптимізувати процес обробки, підвищити якість продукції та зменшити знос інструменту, що сприятиме підвищенню ефективності виробництва за рахунок передбачення зношуваності пластин, зокрема терміну служби.

Виклад основного матеріалу. Досліджено [14] оброблюваність загартованої сталі AISI 1050 ріжучими інструментами на основі кубічного нітриду бору. Умови різання вказано в табл. 1.

Таблиця 1 – Умови різання обробки загартованої сталі AISI 1050

Фактори	Одиниці вимірювання	-2	-1	0	+1	+2
Швидкість різання	м/хв	103	138	173	208	243
Подача	мм	0,10	0,134	0,163	0,203	0,238
Глибина різання	мм	0,41	0,54	0,67	0,80	0,93

Середні значення отриманих показників шорсткості поверхні зображено в табл. 2.

Таблиця 2 – Середні значення шорсткості поверхні отримані після обробці загартованих сталей

№	Основні параметри різання			Виміряні значення шорсткості		
	V	f	d	Ra	Rz	$Rmax$
1	138	0,134	0,54	0,558	3,078	3,348
2	208	0,134	0,54	0,619	3,450	4,033
3	138	0,203	0,54	0,921	4,018	4,365
4	208	0,203	0,54	0,934	3,938	4,293
5	138	0,134	0,80	0,595	3,128	3,393
6	208	0,134	0,80	0,593	3,385	3,913
7	138	0,203	0,80	0,957	4,330	5,290
8	208	0,203	0,80	1,006	4,923	5,200
9	103	0,169	0,67	0,850	3,983	3,940
10	243	0,169	0,67	0,941	5,318	7,785
11	173	0,100	0,67	0,553	3,903	5,798
12	173	0,238	0,67	1,192	5,553	5,978
13	173	0,169	0,41	0,814	3,833	4,040
14	173	0,169	0,93	0,868	4,678	4,858
15	173	0,169	0,67	0,873	4,288	4,348
16	173	0,169	0,67	0,853	3,985	4,333
17	173	0,169	0,67	0,850	3,980	4,270
18	173	0,169	0,67	0,849	4,098	4,718

На рис. 1 зображено отримані значення шорсткості поверхні Ra , Rz , $Rmax$ залежно від швидкості різання, подачі, глибини різання.

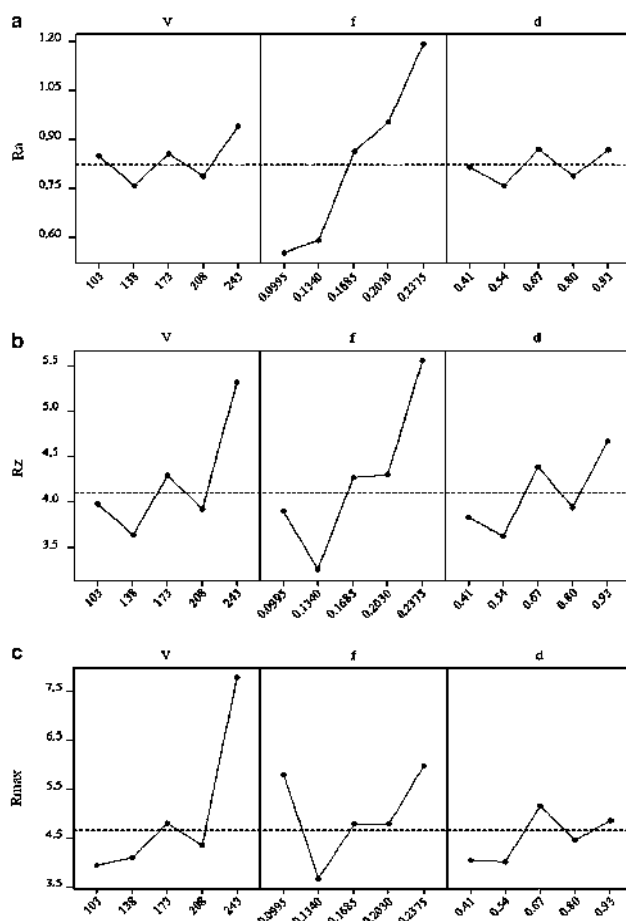


Рис. 1. Вплив основних параметрів різання V , f , d на шорсткість поверхні Ra , Rz , $Rmax$ при обробці загартованих сталей ріжучими інструментами з КНБ

Швидкість різання – V , подача – f , глибина різання – d . Шорсткість поверхні значно зросла зі збільшенням подачі, тоді як при зміні швидкості різання і глибини різання зміни були незначні. Загалом найменші значення шорсткості поверхні R_a , R_z , R_{max} було отримано при зменшенні цих трьох основних факторів. Можна зробити висновок, що при збільшенні V , f , d показники шорсткості зростають. Разом з тим, як ми бачимо, різні параметри різання мають вагомий вплив на якість поверхні важкооброблюваних матеріалів.

Один із сучасних підходів до торцевого фрезерування важкооброблюваних матеріалів є використання ріжучих інструментів із КНБ зі зносостійкими покриттями. Нанесення зносостійких покриттів на ПКНБ різко підвищує їхню довговічність при фрезеруванні важкооброблюваних матеріалів. Покриття забезпечують високу стійкість до окиснення при помірно-високих температурах (до ~ 800 °C), а покриття із вмістом Ti і N – ще вищу термостабільність (до ~ 1100 °C), що критично при високошвидкісному різанні загартованих сталей.

Визначено [15] вплив зносостійких покриттів (Ti(C, N) + (Ti, Al) N + TiN) на механізми зношування інструменту. Аналіз характеристики зносу бічної поверхні інструменту показав, що макросколи, які були утворені на інструментах без покриттів сприяли швидшому руйнуванню ріжучої кромки.

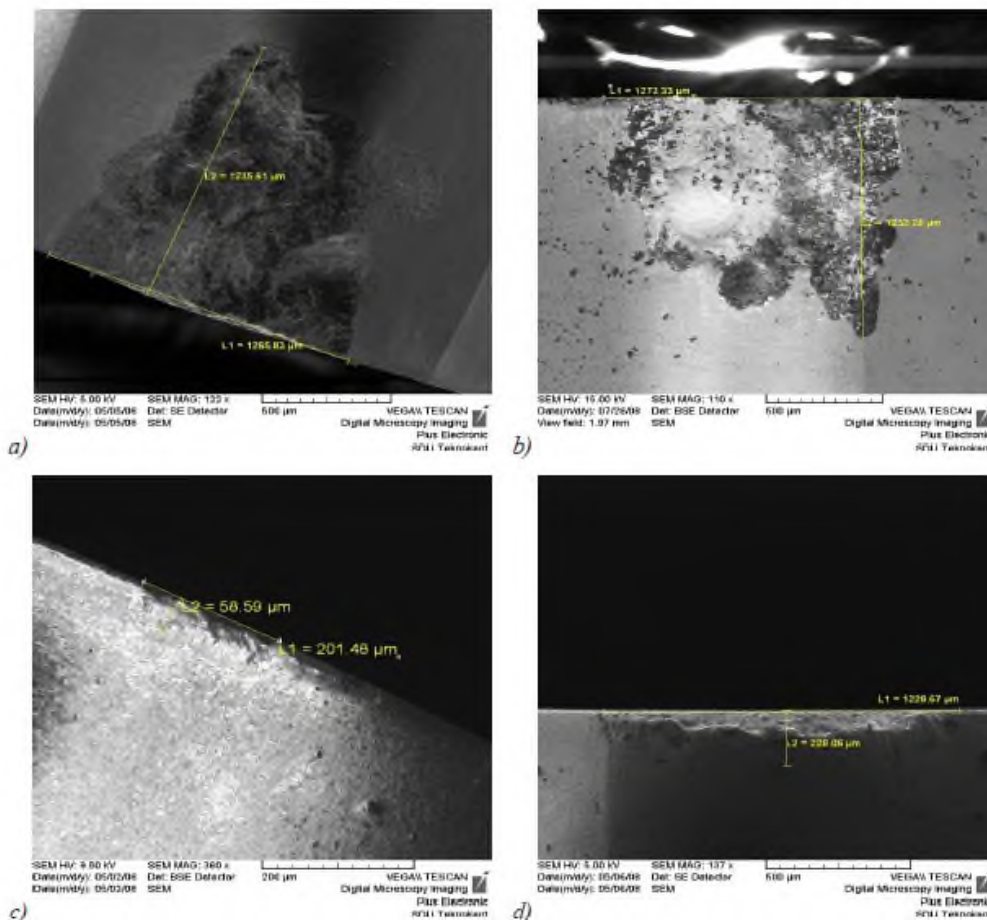


Рис. 3. Знос інструменту SEM-зображення:

- a* – максимальний знос інструменту для пластини з CBN ($v_c = 154,4$ м/хв, $f = 0,15$ мм/зуб);
- б* – максимальний знос інструменту для пластини з покриттям Ti(C,N) + (Ti, Al) N + TiN CBN ($v_c = 154,4$ м/хв, $f = 0,1$ мм/зуб);
- с* – Мінімальний знос інструменту для пластини з CBN ($v_c = 524,5$ м/хв, $f = 0,05$ мм/зуб);
- д* – Мінімальний знос інструменту для пластини з покриттям Ti(C,N) + (Ti, Al) N + TiN CBN ($v_c = 524,5$ м/хв, $f = 0,05$ мм/зуб)

Оптимальна швидкість різання та подача для двох типів пластин була в діапазоні від 450 до 550 м/хв та від 0,05 до 0,1 мм/зуб, відповідно. При обробці загартованої сталі ріжучими інструментами із КНБ без покриттів спостерігається більший знос пластини на 6,25 %, що підтверджує доцільність застосування сучасного підходу як зносостійкі покриття.

Висновки. Сучасні підходи до торцевого фрезерування важкооброблюваних матеріалів включають в себе використання різних груп КНБ для різних діапазонів твердості та типів навантаження, зносостійкі покриття забезпечують стійкість до окиснення при високих температурах, що в подальшому підвищує їх довговічність. Торцеве фрезерування інструментами із КНБ розглядається як сучасний метод альтернативи процесу шліфування при твердості > 55 HRC. Застосування таких інструментів дозволяє досягати низької шорсткості ($R_a < 0.2-0.4$ $\mu\text{м}$) із більшою продуктивністю порівняно зі шліфувальними операціями.

Визначено, що швидкість різання, подача, глибина різання мають значний вплив на якість обробленої поверхні важкооброблюваних матеріалів при торцевому фрезеруванні інструментом із ПКНБ. Найбільший вплив має подача, порівнюючи з іншими параметрами різання. Оптимізація цих параметрів дозволяє досягти високих показників шорсткості поверхневого шару та точності обробки. Використання інструментів із КНБ забезпечує значно кращу якість обробленої поверхні завдяки їх високій твердості та зносостійкості ріжучих елементів. Це підтверджено як теоретичними, так і експериментальними дослідженнями вітчизняних та зарубіжних дослідників. Інструменти з КНБ демонструють високу стійкість до зношування, що сприяє тривалій експлуатації та знижує частоту заміни інструментів, а також позитивно впливає на економічну ефективність машинобудівного виробництва деталей машин.

Список використаних джерел

1. Клименко, С. А. Технологічні можливості інструментів, оснащених композитами на основі кубічного нітриду бора / С. А. Клименко, М. Ю. Копейкіна, А. Ю. Чумак // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2017. – Вип. 12. – С. 54-60.
2. Клименко, С. А. Механічна обробка інструментами з надтвердих матеріалів: стан і перспективи [Електронний ресурс] / С. А. Клименко // Високі технології: тенденції розвитку : матеріали ХХVIII міжнар. науково-техн. семінару, м. Харків, 3-5 листоп. 2020 р. – Харків : Вид-во НТУ «ХПІ», 2020. – С. 37-40. – Режим доступу: https://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2020/12/IP-2020_Matters_TextOnline.pdf.
3. Faga, M. G. Microstructural and mechanical characteristics of recycled hard metals for cutting tools. / M. G. Faga // CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2010. – Pp. 133-136.
4. Slipchenko K. Investigation of the mechanical properties and cutting performance of cBN-based cutting tools with Cr₃C₂ binder phase / K. Slipchenko, I. Petrussha, V. Turkevich, J. Johansson, V. Bushlya, Jan-Eric Ståhlb // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 72. – Pp. 1433-1438.
5. Sumiya H. Mechanical properties of nano-polycrystalline cBN synthesized by direct conversion sintering under HPHT / H. Sumiya, K. Harano, Y. Ishida // Diamond and Related Materials. – 2014. – Vol. 41. – Pp. 14-19.
6. Investigation of the Impact of Face Milling Parameters on the Roughness of the Machined Surface for 1.4301 Steel / Michał Bembenek [et al.] // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2023. – Vol. 17, no. 4. – Pp. 299–312. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/170422>.
7. Rahman, A. M. Modeling and optimization of process parameters in face milling of Ti6Al4V alloy using Taguchi and grey relational analysis / A. M. Rahman, S. A. Rob, A. K. Srivastava // Procedia Manufacturing. – 2021. – Vol. 53 – Pp. 204-212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.023>.
8. Study on grinding mode effect on external conical thread quality / L. Ya Ropyak [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1018. – P. 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1018/1/012014>.

9. Siller, H. R. Study of face milling of hardened AISI D3 steel with a special design of carbide tools / H. R. Siller [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2008. – Vol. 40, no. 1-2. – Pp. 12–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1309-0>.
10. Chou, Y. K. Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting / Y. K. Chou // *Wear*. – 2003. – Vol. 255. – Pp. 1388-1394.
11. Chou, Y. K. Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting / Y. K. Chou, C. J. Evans // *Wear*. – 1999. – Vol. 225-229. – Pp. 234-245.
12. Diniz A. E. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting / Anselmo Eduardo Diniz, Denilson Martins Gomes, Aldo Braghini // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 159, №. 2. – Pp. 240-248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.05.011>.
13. Halpin, T. The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining / T. Halpin [et al.] // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2009. – Vol. 223, №. 8. – Pp. 947-953. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544054jem1488>.
14. Sahin Y. Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool / Y. Sahin, A. R. Motorcu // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2008. – Vol. 26, №. 2. – P. 84-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2007.02.005>.
15. Taylan F. Investigation of TiN Coated CBN and CBN Cutting Tool Performance in Hard Milling Application / Fatih Taylan, Oğuz Çolak, Mehmet Cengiz Kayacan // *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. – 2011. – Vol. 57, №. 05. – Pp. 417-424. DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.059>.

References

1. Klymenko, S. A., Kopeikina, M. Yu., Chumak, A. Yu. (2017). *Tekhnologichni mozhlyvosti instrumentiv, osnashchenykh kompozytamy na osnovi kubichnoho nitrydu bora [Technological capabilities of tools equipped with composites based on cubic boron nitride]*.
2. Klymenko, S. A. (2020). Mekhanichna obrobka instrumentamy z nadtverdykh materialiv: stan i perspektyvy [Mechanical processing with superhard material tools: state and prospects]. *Vysoki tekhnologii: tendentsii rozvytku – High Technologies: Development Trends : materials of the XXVIII International Scientific and Technical Seminar* (pp. 37-40). Vyd-vo NTU «KhPI». http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2020/12/IP-2020_Matters_TextOnline.pdf.
3. Faga, M. G. (2010). Microstructural and mechanical characteristics of recycled hard metals for cutting tools. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 133–136.
4. Slipchenko, K., Petrusha, I., Turkevich, V., Johansson, J., Bushlya, V., & Ståhl, J.-E. (2018). Investigation of the mechanical properties and cutting performance of cBN-based cutting tools with Cr₃C₂ binder phase. *Procedia CIRP*, 72, 1433-1438.
5. Sumiya, H., Harano, K., & Ishida, Y. (2014). Mechanical properties of nano-polycrystalline cBN synthesized by direct conversion sintering under HPHT. *Diamond and Related Materials*, 41, 14-19.
6. Bembenek, M., Dzienniak, D., Dzindziora, A., Sułowski, M., & Ropyak, L. (2023). Investigation of the Impact of Selected Face Milling Parameters on the Roughness of the Machined Surface for 1.4301 Steel. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 17(4), 299–312. <https://doi.org/10.12913/22998624/170422>
7. Rahman, A. M., Rob, S. A., & Srivastava, A. K. (2021). Modeling and optimization of process parameters in face milling of Ti6Al4V alloy using Taguchi and grey relational analysis. *Procedia Manufacturing*, 53, 204-212.
8. Ropyak, L. Y., Vytvytskyi, V., Velychkovych, A., Pryhorovska, T., & Shovkoplias, M. (2021). Study on grinding mode effect on external conical thread quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 012014.
9. Siller, H., Vila, C., Rodriguez, C., & Abellán, J. (2009). Study of face milling of hardened AISI D3 steel with a special design of carbide tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40, 12–25.
10. Chou, Y. K. (2003). Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting. *Wear*, 255, 1388–1394.

11. Chou, Y. K., & Evans, C. J. (1999). Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting. *Wear*, 225–229, 234–245.
12. Diniz, A. E., Gomes, D. M., & Braghini, A. Jr. (2004). Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. *Mater. Processing Technol.*, 129(2), 240–248.
13. Halpin, T., Byrne, G., Barry, J., & Ahearne, E. (2009). The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining. *Proc. IMechE*, 223 Part B: *J. Engineering Manufacture*, 947–953.
14. Sahin, Y., & Motorcu, A.R. (2008). Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 26, 84–90.
15. Taylan, F., Çolak, O., & Kayacan, M. C. (2011). Investigation of TiN Coated CBN and CBN Cutting Tool Performance in Hard Milling Application. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 57(5), 417-424.

Отримано 20.12.2024

УДК 621.9

Ihor Lutsiv

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: kmi_liv@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3980-428X>

**MODERN APPROACHES TO FACE MILLING
OF HARD-TO-MACHINE MATERIALS USING PCBN TOOLS**

The article discusses innovative methods and technologies for face milling of hard-to-machine materials using polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) tools. Special attention is paid to the analysis of the efficiency and durability of cutting tools equipped with superhard inserts, as well as to issues related to the optimisation of the milling process to achieve high quality and precision of the machined surface. The influence of various technological parameters on the stability and productivity of the milling process, as well as the wear characteristics of the cutting elements of the tool, are considered. Special attention is given to the comparison of the properties and characteristics of tool materials, in particular PCBN, with traditional cutting tool materials, demonstrating the advantages of using PCBN for machining difficult-to-machine materials. The results of analytical studies highlight the advantages of using PCBN tools over other tool materials. Recommendations are given for the selection of optimum cutting modes in order to increase the productivity of machine part production and the economic efficiency of the manufacturing process.

Keywords: face milling, polycrystalline cubic boron nitride, hard-to-machine material, wear resistance, cutting modes.
Fig.: 1. References: 14.

Віктор Станіславович Майборода¹, Олексій Олегович Буріков²

¹доктор технічних наук, професор кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: maiborodavs@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>. SCOPUS Author ID: 7004207035

²аспірант кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: alekseyburikov@ukr.net

**МАГНІТНО-АБРАЗИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ
ФЕРОМАГНІТНИХ ДЕТАЛЕЙ ТОРЦЕВИМИ ГОЛОВКАМИ
НА БАЗІ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ МАГНІТІВ**

Досліджено вплив процесу магнітно-абразивного оброблення (МАО) феромагнітних плоских деталей торцевими головками на базі високоенергетичних магнітів на характеристики мікропрофілю поверхонь, залишкові напруження при використанні магнітно-абразивних порошків різної зернистості і форми. Встановлено залежність шорсткості оброблених поверхонь від якості обробки на етапах, що передували МАО. Доведено, що в процесі МАО відбувається мікропластичне деформування поверхневого шару виробів, яке призводить до його наклепування і формування залишкових стискаючих напружень. Керування величиною внутрішніх напружень можливо шляхом зміни величини робочого зазору, часу оброблення, розміру і форми частинок магнітно-абразивних порошків.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення; торцеві головки; магнітно-абразивні порошки; залишкові напруження; мікрогеометрія поверхонь; шорсткість; високоенергетичні магніти.

Рис.: 4. Табл.: 1. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Створення універсального інструменту, для фінішного оброблення виробів, який можна використовувати як на традиційних металорізальних верстатах, так і на верстатах з ЧПК при обробленні плоских поверхонь феромагнітних деталей є актуальною проблемою, вирішення якої може бути досягнуто методом магнітно-абразивного оброблення (МАО), який реалізується із застосуванням спеціальних торцевих головок на базі сталих високоенергетичних магнітів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попередні дослідження процесу МАО з використанням різноманітних конструкцій торцевих головок, виготовлених на базі потужних сталей неодимових магнітів [1–4] дозволили встановити раціональні форми робочих поверхонь і особливостей розташування магнітів в корпусах торцевих головок. Отримані результати впливу технологічних умов процесу МАО, типу і складу магнітно-абразивних порошків дозволили встановити раціональні швидкості оброблення, величини робочих зазорів, часу оброблення необхідного для отримання низької шорсткості оброблюваних поверхонь. Проте об'єм наведених результатів обмежений і не враховує спадковості попереднього оброблення, не дозволяє однозначно визначити форму і розмір частинок магнітно-абразивних порошків, особливо враховуючи той факт, що експериментальні результати, отримані при МАО площин торцевими головками порошками з розміром частинок 630/400 мкм забезпечують формування мінімальної шорсткості поверхонь з $Ra < 0,1$ мкм, що суперечить загально відомій інформації – чим дрібніші зерна магнітно-абразивного порошку при МАО, тим меншу величину параметру Ra можливо отримати [5–7]. Зазначене протиріччя може бути пов'язано з відсутністю інформації про кінетику формування мікропрофіля шорсткої поверхні при МАО торцевими головками, що ускладнює визначення технологічних умов оброблення, спрямованих на досягнення низької шорсткості поверхонь з певним її мікропрофілем і властивостями.

Метою роботи є визначення впливу на шорсткість, мікрогеометрію і окремі фізико-механічні властивості оброблених методом МАО поверхонь, факторів пов'язаних з спадковістю оброблення, тобто величиною шорсткості і стану мікрогеометрії поверхонь до МАО, розміру, форми частинок використовуваних порошків. Доцільним є проведення досліджень з використанням магнітно-абразивних порошків різної геометричної форми з розміром частинок більше 1 мм.

Експериментальні дослідження виконували на плоских поверхнях зразків зі сталі 40Х в два етапи. Для MAO використовували торцеву головку типу "щітка" [1], частота її обертання навколо власної осі 900 об/хв і величина поперечної подачі 20 мм/хв. На першому етапі при використанні магнітно-абразивних порошків осколкової форми Феромап з розміром частинок 200/100 мкм, 315/200 мкм, 400/315 мкм і 630/400 мкм величина зазору між поверхнею головки та оброблюваною варіювалась в діапазоні 1 – 4 мм. Шорсткість поверхонь зразків після шліфування абразивним кругом з електрокорунду нормального 15А складала 0,19 – 0,21 мкм; після шліфування алмазним кругом – $Ra=0,49 – 0,52$ мкм. На другому етапі шорсткість поверхонь до MAO складала $Ra=0,53 – 0,68$ мкм. Оброблення виконували магнітно-абразивними порошками сферичної форми S330 та дробом чавунним (ДЧ) з середнім розміром частинок 1,62 мм і 1,5 мм відповідно. На кожному етапі досліджень контролювали величину параметру шорсткості Ra після MAO та характер зміни величини відносної опорної довжини профілю – tp в залежності від рівня перетину – p . Отримані на першому етапі результати зміни параметра Ra наведено на рис. 1.

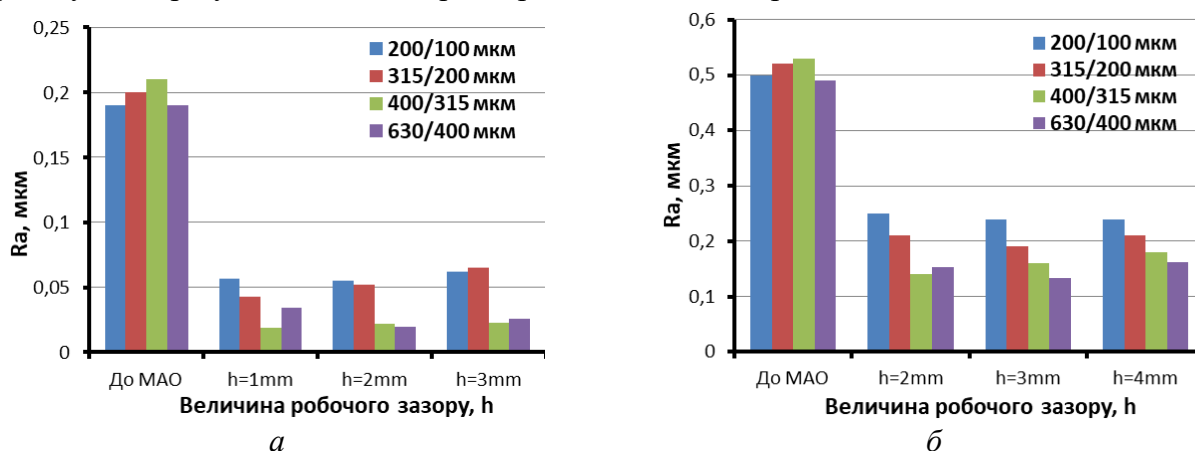


Рис. 1. Зміна шорсткості поверхні після MAO різними за розміром порошками і при різних робочих зазорах і середній вихідній шорсткості $Ra = 0,2$ мкм (а) і $Ra=0,51$ мкм (б)
Джерело: розроблено авторами.

Найкращі результати отримані при MAO крупними порошками з величиною робочого зазору $h=2-3$ мм. Відзначимо, що чим менша величина Ra була отримана до MAO, тим краща шорсткість формується після MAO. Це пов'язано з величиною мікрохвилястості поверхні, сформованої на етапі шліфування. Підтвердженням цього є залежності зміни величини відносної опорної довжини профілю – tp від рівня перетину – p (рис. 2).

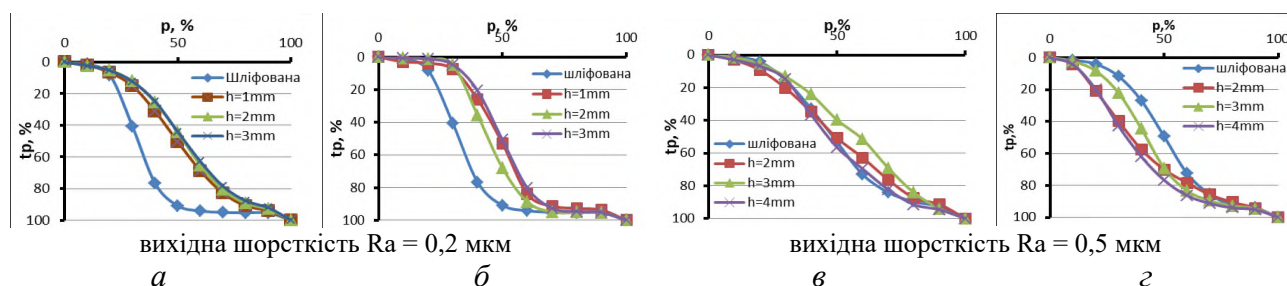


Рис. 2. Залежності зміни величини відносної опорної довжини профілю – tp від рівня перетину – p після MAO порошком Феромап з розміром частинок 200/100 мкм (а), 630/400 мкм (б), 400/315 мкм (в), 630/400 мкм (г)
Джерело: розроблено авторами.

Порівняння залежностей зміни величини відносної опорної довжини профілю – tp до і після MAO свідчить про те, що в процесі оброблення має місце активне пластичне деформування поверхневого шару яке сприяє процесу вигладжуванню мікропрофіля [9].

Для підтвердження наявності активного пластичного деформування поверхні після MAO на тестових зразках з сталі У9 було виконано контроль середнього рівня залишкових напружень в поверхневому шарі [11]. На цьому етапі досліджень використовували осколковий рівновісний магнітно-абразивний порошок Феромап з розміром частинок 1000/630 мкм. Величину робочого зазору варіювали в діапазоні 3-7 мм, а час оброблення від 3 до 12 хвилин. Як і на попередніх етапах досліджень була використана торцева головка типу «щітка» [1] при частоті її обертання навколо власної осі 900 об/хв і величині поперечної подачі 20 мм/хв. Розраховані значення залишкових напружень після MAO наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Залишкові напруження в тестових зразках з сталі У9 після MAO

Час MAO, хв	Робочий зазор, мм				
	3	4	5	6	7
	Напруження, МПа				
3	39,53	57,5	60,9	71	55
6	52,4	58,6	67	74,2	55,2
9	57,9	57,5	65	73	57
12	59,2	58	63	72,2	56,3
15	62,5	58,6	60	71,8	56,3

Джерело: розроблено авторами.

Встановлено, що вихід на стабільні параметри напружень відбувається за 3-6 хвилин. При цьому активна взаємодія часток магнітно-абразивного порошку та оброблюваної поверхні майже припиняється внаслідок виходу на рівномірну шорсткість та затухання процесу активної пластичної деформації. Підвищений рівень залишкових напружень при значенні зазору 6 мм може бути пов'язаний з раціональною величиною робочого зазору при MAO порошком Феромап із розмірами фракції 1000 мкм /630 мкм, при якому формується стабільний магнітно-абразивний інструмент [10].

Враховуючи результати вище наведених досліджень і результатів робіт [8–10] на другому етапі використовували магнітно-абразивні порошки з крупним розміром частинок округлої форми. MAO в умовах ідентичних першому етапу було отримано зниження шорсткості в 2,5–4 рази. Причому використання більш крупних частинок дозволило отримати кращі результати (рис. 3).

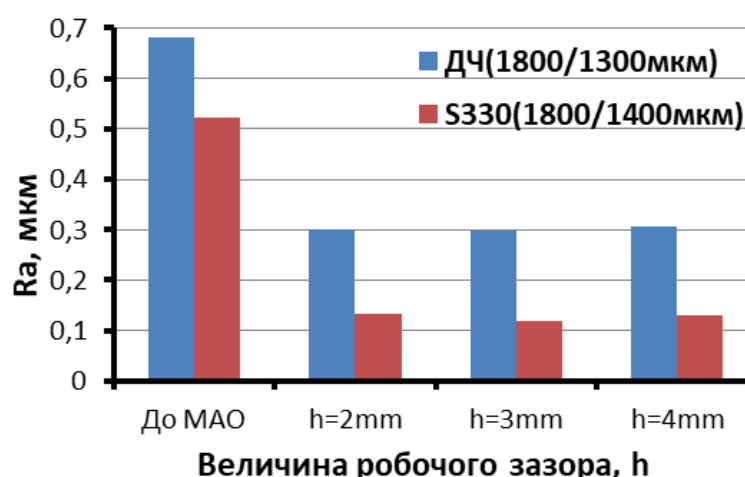


Рис. 3. Зміна шорсткості поверхні після MAO різними порошками і при різних величинах робочих зазорів – h, мм

Джерело: розроблено авторами.

Характер зміни величини відносної опорної довжини профілю – tr від рівня перетину – p після MAO порошками сферичної форми при різних величинах робочих зазорів наведено на рис. 4.

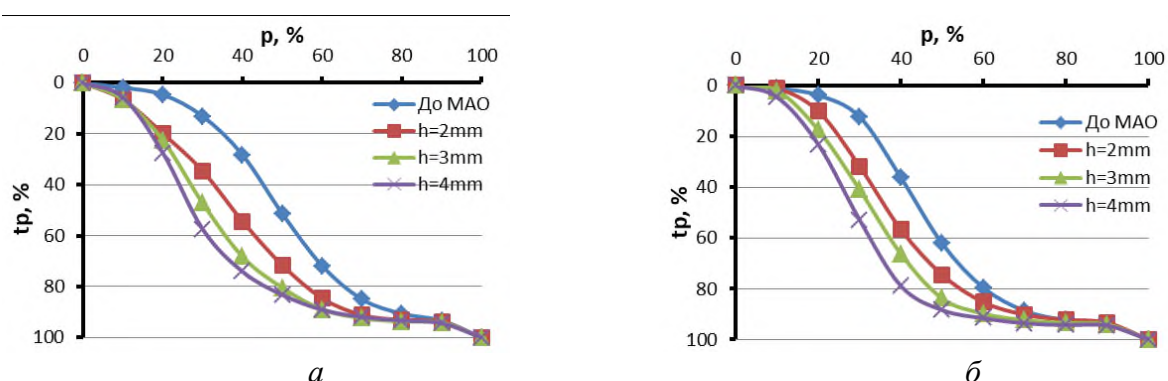


Рис. 4. Залежності зміни величини відносної опорної довжини профілю – tr від рівня перетину – p після MAO порошком S330 з розміром частинок 1800/1400 мкм (а), ДЧ розміром частинок 1800/1300 мкм (б)

Джерело: розроблено авторами.

Встановлено, що за умов MAO, ідентичних обробленню зразків із сталі 40X, на тестових зразках при використанні порошку S330 ступінь наклепу на глибині 3 мкм дорівнює 0,53, а на глибині 5 мкм – 0,3, а при використанні порошку ДЧ – 0,44 і 0,31, відповідно. Рівень залишкових стискаючих напружень після MAO порошком S330 досягає 118 МПа, а порошком ДЧ – 165 МПа.

Висновки. Виконано комплексні дослідження впливу процесу MAO феромагнітних плоских поверхонь торцевими головками на базі високоенергетичних магнітів на характеристики мікропрофілю поверхонь, залишкових напружень при використанні магнітно-абразивних порошків різної зернистості і форми. Показано, що в залежності від вихідної шорсткості поверхонь метод MAO забезпечує можливість отримання параметру шорсткості R_a на рівні 0,03 – 0,12 мкм. Показано, що чим менша величина параметру R_a була отримана до MAO, тим нижча шорсткість формується після, що пов'язано з спадковістю оброблення, величиною мікрохвилястості поверхні, сформованої на етапах фрезерування та шліфування. Доведено, що в процесі MAO відбувається мікропластичне деформування поверхневого шару виробі, яке призводить до його наклепування та формуванню в ньому залишкових стискаючих напружень, величина яких залежить як від розмірів частинок магнітно-абразивних порошків, так і від їх форми. Найбільші напруження на рівні 75-165 МПа отримано при використанні переважно порошків округлої форми з розміром частинок в діапазоні 0,8 - 1,62 мм. Керування величиною внутрішніх напружень можливо шляхом зміни величини робочих зазорів, тривалості часу оброблення, розміру і форми частинок магнітно-абразивних порошків.

Список використаних джерел

1. Maiboroda, V. S. AISI 1045 Steel Flat Surfaces Machining Using the Magneto-Abrasive Method [Electronic resource] / V. S. Maiboroda, O. O. Belajev, D. Yu. Dzhulii, I. V. Slobodianiuk // Journal of Engineering Sciences. – 2020. – Vol. 7, no. 1. – P. A1–A7. – Mode of access: [https://doi.org/10.21272/jes.2020.7\(1\).a1](https://doi.org/10.21272/jes.2020.7(1).a1).
2. Zelinko A. Magnetabrasives Polieren auf Bearbeitungszentren: Phd-Thesis, Technischen Universität Dortmund, Germany, 2022. – 153 p.
3. Maiboroda V. S. Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads. 2. The influence of the design of the working surfaces of the heads on the effectiveness of the magneto-abrasive machining / V. S. Maiboroda, D. Yu. Dzhulii, A. I. Zelinko, A. Burikov // Mechanics and Advanced Technologies. – 2020. – Vol. 90, № 3. – Pp. 73-81.

4. Майборода, В. С. Обработка плоских поверхностей магнитно-абразивным методом торцевыми головками на постоянных магнитах 3. Влияние типа рабочих головок на эффективность магнитно-абразивной обработки / В. С. Майборода, Д. Джулий, А. Зелинко, О. Буриков // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2021. – Т. 5, Вып. 1. – С. 97-102.

5. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.

6. Олиker, В. Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В. Е. Олиker. – Москва: Металлургия, 1990. – 176 с.

7. Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 327 с.

8. Майборода, В. С. Магнитно-абразивная обработка плоских поверхностей головками на постоянных магнитах / В. С. Майборода, И. В. Слободянюк, Д. Ю. Джулий, А. И. Зелинко // *Технічна інженерія*. – 2020. – № 1(85). – С. 60-65.

9. Шкурупий, В. Г. Аналитическое описание и технологическое обеспечение параметров шероховатости обработки / В. Г. Шкурупий, Ф. В. Новиков // *Резание и инструмент в технологических системах*. – 2004. – Вып. 67. – С. 46-56.

10. Майборода, В. С. Обработка плоских поверхностей магнитно-абразивным методом торцевыми головками на постоянных магнитах. 1. Влияние типа магнитно-абразивного порошка на эффективность магнитно-абразивной обработки / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулий, А. И. Зелинко // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2020. – Том 89, № 2. – С. 121-130.

11. Буриков, О. О. Влияние магнитно-абразивной обработки на характеристики поверхностного шару плоских деталей. / О. Буриков, В. Майборода, Д. Джулий // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2022. – Том 6, № 3. – С. 286-292.

References

1. Maiboroda, V.S., Belajev, O.O., Dzhulii, D.Yu., Slobodianiuk, I.V. (2020). AISI 1045 Steel Flat Surfaces Machining Using the Magneto-Abrasive Method. *Journal of Engineering Sciences*, 7(1), A1–A7. doi: 10.21272/jes.2020.7(1).a1.

2. Zelinko, A. (2022). Magnetabrasives Polieren auf Bearbeitungszentren. *Phd Thesis*. Technischen Universität Dortmund, Germany.

3. Maiboroda, V.S., Dzhulii, D.Yu., Zelinko, A.I., Burikov, A. (2020). Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads. 2. The influence of the design of the working surfaces of the heads on the effectiveness of the magneto-abrasive machining. *Mechanics and Advanced Technologies*, 90(3), 73-81.

4. Maiboroda, V., Dzhuliy, D., Zelinko, A., Burikov, O. (2021). Obroblennya ploskykh poverkhon mahnitno-abrazyvnyim metodom tortsevymy holovkamy na postiynykh mahnitakh 3. Vplyv typu robochykh holovok na efektyvnist mahnitno-abrazyvnoho obroblennya [Machining of flat surfaces by magnetic abrasive method with permanent magnet end heads 3. Influence of the type of working heads on the efficiency of magnetic abrasive machining]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(1), 97–102.

5. Baron, Yu.M. (1986). *Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdeliy i rezhushchikh instrumentov* [Magnetic-abrasive and magnetic processing of products and cutting tools]. Mashinostroyeniye.

6. Olikier, V.Ye. (1990). *Poroshki dlya magnitno-abrazivnoy obrabotki i iznosostoykikh pokrytiy* [Powders for magnetic-abrasive processing and wear-resistant coatings]. Moscow: Metallurgiya.

7. Sakulevich, F.Yu. (1981). *Osnovy magnitno-abrazivnoy obrabotki* [Fundamentals of magnetic abrasive processing]. Minsk: Nauka i tekhnika.

8. Maiboroda, V.S., Slobodyanyuk, I.V., Dzhuliy, D.Yu., Zelinko, A.I. (2020). Magnitno-abrazivnaya obrabotka ploskikh poverkhnostey golovkami na postoyannykh magnitakh [Magnetic abrasive machining of flat surfaces by permanent magnet heads]. *Tekhnichna inzheneriya – Technical Engineering*, 1(85), 60-65.

9. Shkurupiy, V.G., Novikov, F.V. (2004). Analiticheskoye opisaniye i tekhnologicheskoye obespecheniye parametrov sherokhovatosti obrabotki [Analytical description and technological support of machining roughness parameters]. *Rezaniye i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting and tooling in technological systems*, 67, 46–56.

10. Maiboroda, V.S., Dzhuliy, D.Yu., Zelinko, A.I. (2020). Obrabotka ploskikh poverkhnostey magnitno-abrazivnym metodom tortsevymi golovkami na postoyannykh magnitakh. 1. Vliyaniye tipa magnitno-abrazivnogo poroshka na effektivnost magnitno-abrazivnoy obrabotki [Processing of Flat Surfaces by Magnetic Abrasive Method with Permanent Magnet End Heads. 1. Influence of the Magnetic Abrasive Powder Type on the Effectiveness of Magnetic Abrasive Processing]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 89(2), 121-130.

11. Burikov, O., Maiboroda, V., Dzhuliy, D. (2022). Vplyv mahnitno-abrazyvnoho obroblennya na kharakterystyky poverkhnoveho sharu ploskykh detaley [Influence of magnetic abrasive treatment on the characteristics of the surface layer of flat parts]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 6(3), 286-292.

Отримано 28.11.2024

UDC 621.923

Victor Maiboroda¹, Oleksij Burikov²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of machine design

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

E-mail: maiborodavs@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>. SCOPUS Author ID: 7004207035

²PhD Student of the Department of machine design

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

E-mail: alekseyburikov@ukr.net

MAGNETIC-ABRASIVE TREATMENT OF FLAT SURFACES OF FERROMAGNETIC PARTS WITH END HEADS BASED ON HIGH-ENERGY MAGNETS

A comprehensive study of the influence of the process of magnetic-abrasive machining (MAM) of ferromagnetic flat parts with end heads based on high energy magnets on the characteristics of the surface microprofile and residual stresses has been carried out. The study was carried out using magnetic abrasive powders of different grain sizes and shapes. The results of the research showed that, depending on the initial surface roughness, this process makes it possible to obtain the roughness parameter Ra in the range of 0.03 - 0.12 microns. The lower the value of the roughness parameter Ra obtained before the process of magnetic-abrasive machining, the lower the roughness formed after magnetic-abrasive machining. Such results are explained by the heredity of the machining, in particular by the size of the surface micro-roughness formed during the stages of pre-processing by milling and grinding. It has been shown that during the process of magnetic-abrasive machining, microplastic deformation of the surface layer of the products occurs, which leads to their riveting and the formation of residual compressive stresses in them. The magnitude of the residual compressive stresses depends on the size of the particles of the magnetic-abrasive powders and their shape. During the research, the highest stress values in the range of 75-165 MPa were obtained when using mainly rounded powders with a particle size in the range of 0.8-1.62 mm. In the case of magnetic-abrasive machining, it is possible to control the magnitude of internal stresses in the surface layer of parts by changing the size of the working gap, the duration of the machining time, the size and shape of the particles of magnetic-abrasive powders.

Keywords: magnetic abrasive machining; end heads; magnetic abrasive powders; residual stresses; surface microgeometry; roughness; high-energy magnets.

Fig.: 4. Table: 1. References: 11.

**Володимир Віталійович Кальченко¹, Володимир Іванович Венжега²,
Геннадій Володимирович Пасов³, Антоніна Вікторівна Кологойда⁴,
Богдан Сергійович Завертанний⁵, Ярослав Володимирович Кужельний⁶**

¹доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vykalchenko74@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9072-2976>
ResearcherID: G-6752-2014. Scopus Author ID: 56644727300

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vivenzhega@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8857-349X>
ResearcherID: H-3560-2014. Scopus Author ID: 16510833000

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна).
E-mail: genapasov@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>
ResearcherID: H-4455-2014. Scopus Author ID: 57220212743.

⁴кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: kolohoida@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1742-2686>
ResearcherID: I-1118-2014. Scopus Author ID: 57222329484

⁵кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: zavertannyi@stu.cn.ua. ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7492-3663>
ResearcherID: KHD-2575-2024. Scopus Author ID: 57219253414

⁶кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна).
E-mail: k.y.v.immortal.@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5269-8557>
ResearcherID: J-1127-2016

СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШЛІФУВАННЯ

У роботі проаналізовано основні фактори, що впливають на точність розмірів, відхилень форми і розташування, шорсткість поверхонь, прихованих дефектів, продуктивність процесу при проведенні абразивної обробки широкої номенклатури виробів із високоточними циліндричними, конічними, торцевими, сферичними, торовими, гвинтовими і криволінійними поверхнями. На основі проведеного аналізу пропонується разом із використанням традиційних методів абразивної обробки в кожному конкретному випадку в залежності від вимог по точності, серійності виробництва, використовуваного обладнання та інструменту застосовувати сучасні методи, обладнання, інструмент та матеріали, такі як суперабразивні матеріали, інноваційні шліфувальні круги, системи шліфування з охолодженням рідким азотом, мінімальним змащенням (MQL), високошвидкісне шліфування (HSG), використання CNC-систем.

Стаття є публікацією оглядово-інформаційного характеру.

Ключові слова: абразивна обробка; шліфування; абразивний інструмент; ефективність шліфування; точність розмірів; шорсткість поверхонь.

Рис.: 1. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. У сучасній продукції машинобудування для виконання службового призначення широко застосовуються деталі з високоточними циліндричними, конічними, торцевими, сферичними, торовими, гвинтовими та криволінійними поверхнями, остаточно якість яких визначається фінішними операціями. Трудомісткість операцій, що здійснюються на шліфувальних верстатах, оснащених абразивним інструментом, постійно зростає у загальному обсязі трудомісткості обробки і складає в середньому 25-30%, а в окремих галузях до 50 % загальної трудомісткості обробки. Тому дуже важливим є пошук нових і впровадження прогресивних існуючих способів абразивної обробки з охоптом широкої номенклатури оброблюваних деталей різного призначення для підвищення ефективності процесів. Це значна наукова й технологічна проблема, що

має важливе народногосподарське значення для машинобудування, верстатобудування, автомобільної, текстильної, вальничої промисловостей, трубовальцевого виробництва й енергетики України.

Постановка проблеми. Сучасна техніка – складні технічні системи, що працюють із високими швидкостям, під великим силовими навантаженнями, тому потребують високих вимог до точності розмірів, відхилень форми й розташування, шорсткості поверхонь деталей. Це включає дотримання всіх дій, пов'язаних із виготовленням продукту виробництва, а саме:

- підготовку засобів виробництва та їх обслуговування;
- одержання, транспортування і зберігання матеріалів, напівфабрикатів, вихідних заготовок, комплектуючих деталей і складальних одиниць;
- механічну, термічну обробку, миття, фарбування, балансування, старіння;
- технічний контроль, випробування і атестацію продукції на всіх етапах виробництва.

Одним із найбільш важливих етапів є механічна обробка для отримання кінцевої точності, особливо для високоточних виробів, за допомогою абразивної обробки на шліфувальних верстатах різного типу. У роботі потрібно провести дослідження відомих сучасних методів та інструменту для підвищення ефективності обробки на заключних етапах, а саме при шліфуванні та запропонувати сучасні способи вирішення проблем для покращення якості та конкурентоспроможності продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвитку абразивної обробки сприяло створення нових абразивних матеріалів і нових зв'язків, вдосконалення технології отримання абразивних матеріалів та інструментів із них, створення нових методів обробки [1].

Абразивні матеріали є матеріалами підвищеної твердості, що застосовуються в масивному й подрібненому стані для механічної обробки. Абразивні матеріали можуть бути як природного, так і штучного походження.

До природних матеріалів належать: природний алмаз, корунд, наждак, кварцовий пісок, гранат, кремій.

До штучних абразивних матеріалів належать: алмаз синтетичний; ельбор; штучний електрокорунд, який випускається у вигляді кількох різновидів: нормального електрокорунду (вміщує 93-95 % корунду, решта – домішки), білого електрокорунду (вміщує 98-99 % корунду, решта – домішки), легованого електрокорунду (титанові та хромові електрокорунди), монокорунду; карбїду кремнію; карбїду бору.

Група шліфувальних, полірувальних, викінчувальних, заточувальних верстатів поєднується за ознакою використання як різального інструменту абразивних шліфувальних кругів. Найбільш поширені серед них круглошліфувальні, безцентровошліфувальні, внутрішньошліфувальні, плоскошліфувальні, спеціалізовані, спеціальні й заточувальні [2].

Під дією високих температур у зоні обробки матеріали деталей зазнають структурних і фазових перетворень, які викликають залишкові напруження, тому виникає потреба в зону різання подавати змащувально-охолоджувальні рідини [3; 4]. У більшості така рідина подається під тиском насосом, очищується через фільтри і знову з бака подається циклічно. Для визначення залишкових напружень використовується методика, що ґрунтується на положеннях механічного способу академіка М. М. Давиденкова. Повне залишкове напруження визначається як сума напружень, що знімаються при розрізі досліджуваного зразка і при послідовному видаленні шарів металу.

Адаптивні системи керування шліфувальних верстатів (АСКШВ) призначені для автоматичного регулювання параметрів процесу шліфування в режимі реального часу, що дозволяє забезпечити високу точність та якість обробки. Вони враховують динамічні зміни

умов роботи, такі як знос шліфувального круга, температурні зміни, властивості матеріалу, а також вплив зовнішніх факторів [5]. Основними перевагами верстатів з адаптивними системами керування є:

- підвищення точності обробки за рахунок автоматичного підлаштування параметрів для досягнення необхідної якості обробки;
- зменшення браку шляхом автоматичного виявлення та корекції помилок під час процесу обробки;
- зниження зносу інструменту, так як оптимізація режимів роботи допомагає знизити навантаження на інструмент і продовжити його термін служби;
- підвищення продуктивності мінімізацією простоїв та максимальним використанням можливостей верстата.

Важливим параметром, який впливає на якість обробки, термін служби інструменту та продуктивність процесу шліфування є швидкість шліфування (або швидкість різання при шліфуванні) — це швидкість, з якою абразивний інструмент або шліфувальний круг обертається під час обробки матеріалу [6]. Вона вимірюється в метрах за секунду (м/с). Визначення правильної швидкості шліфування залежить від матеріалу заготовки, характеристик шліфувального круга (зернистість, твердість, матеріал, структура, розміри), типу обробки (чорнова, напівчистова, чистова). Оптимальна швидкість шліфування забезпечує баланс між швидкістю зняття матеріалу та якістю поверхні, що обробляється.

Для абразивної обробки: заточування, шліфування, притирки, суперфінішування і т. ін. служить абразивний інструмент. Він поділяється на інструмент на жорсткій основі (круги, головки, сегменти, бруски), інструмент на гнучкій основі (еластичні круги, шкурки, стрічки), пасти, абразивні зерна [7].

Інструмент на жорсткій основі характеризується видом абразивного матеріалу, його зернистістю, твердістю, структурою, зв'язкою, класом точності, формою та розмірами.

Кожний вид інструменту на жорсткій зв'язці являє собою тіло, утворене абразивними зернами, з'єднаними різними видами зв'язок. Абразивні зерна можуть вільно розташовуватись у всьому об'єму тіла, знаходитись тільки в робочому прошарку, можуть бути орієнтованими так, щоб забезпечити найбільш ефективний процес шліфування. Залежно від умов застосування використовуються різні форми шліфувальних кругів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що для підвищення ефективності процесів шліфування потрібен системний і комплексний підхід. Він повинен враховувати реальні умови виробництва які не завжди повною мірою можуть забезпечити точність та продуктивність процесу, із впровадження сучасних методів та інструменту для абразивної обробки деталей широкої номенклатури.

Метою статті є аналіз методів підвищення ефективності шліфування різноманітних поверхонь деталей за рахунок впровадження сучасних методів та інструменту як бази для створення нових способів шліфування і визначення умов та областей їх раціонального застосування.

Виклад основного матеріалу. Проведемо систематизацію сучасних основних напрямів, які найбільше впливають на якість та продуктивність абразивної обробки на верстатах.

1. Використання суперабразивних матеріалів.

1.1. Алмазні абразиви.

Алмазні абразиви виготовляються з натуральних або синтетичних алмазів, які є найтвердішим відомим матеріалом. Їх висока твердість і зносостійкість дозволяють обробляти важкооброблювані матеріали з мінімальним зносом інструменту. Це особливо актуально для шліфування надтвердих матеріалів, таких як карбіди, кераміка та композити. Вони забезпечують більший термін служби інструменту і високу якість поверхні.

1.2. Кубонітридні абразиви.

Кубонітридні абразиви виготовляються з кубічного нітриду бору (CBN), що є другим за твердістю матеріалом після алмазу. CBN має кілька унікальних властивостей, які роблять його ідеальним для обробки:

- висока твердість, майже така ж, як у алмазу, що дозволяє обробляти надтверді матеріали;
- термічна стійкість вища ніж в алмаза, що робить його придатним для роботи з матеріалами, які виділяють багато тепла під час обробки;
- хімічна стійкість виключає взаємодію з залізом та його сплавами, що робить його придатним для шліфування сталей;
- тривалий термін служби, завдяки чому інструменти з CBN довше зберігають свою абразивну здатність, ніж традиційні абразиви.

Враховуючи зазначені властивості абразивні інструменти із CBN знайшли застосування для шліфування високошвидкісних сталей, нержавіючих сталей, легованих сталей, чавунів та інших твердих матеріалів.

1.3. Мікроскопічні абразивні частинки.

Мікроскопічні абразивні частинки використовуються для створення надгладких поверхонь, що зменшує потребу в додатковій обробці. Мікроскопічні абразивні частинки – це дуже малі тверді частинки, які використовуються для шліфування, полірування або різання матеріалів. Вони можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як алмаз, карбід кремнію, корунд (оксид алюмінію) та інші, залежно від їхнього застосування та необхідних властивостей. Ці частинки використовуються в різних галузях, включаючи металообробку. Завдяки своїм малим розмірам, вони можуть проникати у важкодоступні місця, забезпечуючи більш точне й ефективне оброблення поверхонь.

2. Прецизійне шліфування на високоточних шліфувальних верстатах.

Високоточні шліфувальні верстати — це спеціалізовані машини, які використовуються для обробки деталей з мінімальними допусками та високою якістю поверхні.

Основними типами високоточних шліфувальних верстатів є:

- круглошліфувальні верстати для обробки циліндричних поверхонь деталей, таких як вали, підшипники тощо;
- плоскошліфувальні верстати для шліфування плоских поверхонь та для виготовлення деталей зі складною геометрією;
- безцентровошліфувальні верстати для обробки деталей без закріплення їх в центрах, що дозволяє обробляти тонкі та довгі деталі з високою швидкістю і точністю;
- внутрішньошліфувальні верстати для обробки внутрішніх поверхонь отворів у деталях;
- ультраточні шліфувальні верстати для обробки особливо складних та відповідальних деталей, де потрібна точність на рівні мікронів.

3. Кріогенне шліфування.

Охолодження здійснюється за допомогою рідкого азоту. Кріогенне шліфування зменшує теплове навантаження на оброблюваний матеріал, що запобігає виникненню термічних дефектів. Цей метод особливо ефективний для термочутливих матеріалів, таких як сплави титану та різні композити. Кріогенне шліфування – це процес обробки матері-

алів, який використовує наднизькі температури для заморожування та підвищення крихкості матеріалів перед їх шліфуванням. Це особливо важливо для матеріалів, які мають високу в'язкість. Криогенне шліфування включає два етапи. Першим етапом є заморожування. Матеріал охолоджується рідким азотом або іншими охолоджувальними агентами до дуже низьких температур (звичайно нижче $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$), що робить його більш крихким. На другому етапі здійснюється уже сам процес шліфування.

Оскільки матеріал крихкий, він легко розпадається на дрібні фрагменти, що полегшує процес обробки. Цей метод дозволяє зберегти цілісність матеріалу та забезпечує високу точність обробки.

4. Система мінімального змащення (MQL).

Система мінімального змащування MQL (Minimal Quantity Lubrication) — це технологія, яка використовується в обробці металів для зниження кількості мастильних матеріалів, що подаються в зону різання. Основна мета MQL – зменшити кількість мастила до мінімально необхідного рівня, щоб досягти ефективного охолодження та змащування, при цьому мінімізуючи вплив на навколишнє середовище та знижуючи витрати.

Основні характеристики та переваги MQL:

4.1. Мінімальна кількість мастила. MQL використовує значно менші об'єми мастильного матеріалу порівняно з традиційними методами охолодження та змащування.

4.2. Подача аерозолю. Мастило зазвичай подається у вигляді аерозолю, що складається з дрібних крапель мастила, змішаних з повітрям. Це забезпечує ефективне охолодження та змащування без надмірного мастила.

4.3. Покращена якість обробки. MQL сприяє зменшенню температури в зоні різання та зниженню тертя, що може покращити якість поверхні оброблюваного матеріалу та збільшити тривалість служби інструменту.

4.4. Зменшення відходів. Оскільки використовується менше мастильного матеріалу, кількість відходів значно знижується, що знижує витрати на утилізацію та покращує екологічну ефективність процесу.

4.5. Зменшення ризиків для здоров'я: менша кількість мастильних матеріалів знижує ризик виникнення небезпечних для здоров'я ситуацій, таких як утворення туману, що може викликати респіраторні проблеми.

5. Автоматизація та цифрові технології.

Автоматизація процесу шліфування з використанням CNC-систем дозволяє досягти високої точності та повторюваності. Це дає можливість оптимізувати параметри шліфування в режимі реального часу, зменшити час налаштування та підвищити продуктивність. Сучасні шліфувальні верстати оснащені адаптивними системами, які автоматично налаштовують параметри процесу залежно від умов шліфування. Це дозволяє досягти оптимальних результатів при мінімальних витратах часу й ресурсів.

6. Високошвидкісне шліфування (HSG).

6.1. Використання високошвидкісних шліфувальних кругів: Збільшення швидкості різання дозволяє значно підвищити продуктивність, одночасно зберігаючи високу якість обробки.

6.2. Зниження сили шліфування: За рахунок підвищеної швидкості можна зменшити силу натискання, що знижує знос інструменту та покращує якість поверхні.

7. Інноваційні шліфувальні круги.

Основними типами інструменту є гібридні та нанокompозитні шліфувальні круги. Використання нових матеріалів та їхніх комбінацій дозволяє створювати шліфувальні круги з поліпшеними характеристиками, такими як підвищена зносостійкість, краще видалення стружки та зниження температури в зоні різання.

Гібридні та нанокompозитні шліфувальні круги являють собою прогресивні інструменти, що використовуються для обробки різних поверхонь, зокрема металів, кераміки та інших твердих матеріалів. Вони комбінують властивості традиційних шліфувальних матеріалів з перевагами нанотехнологій і сучасних композитів, що дозволяє досягти значно кращих результатів у точності, довговічності та ефективності обробки.

Гібридні шліфувальні круги поєднують властивості двох або більше матеріалів, таких як кераміка, метали, полімери та інші зв'язуючі речовини. Вони забезпечують кращу зносостійкість і стійкість до температур, що робить їх ефективними для важких або високошвидкісних операцій шліфування. Такі круги часто використовуються у випадках, коли необхідно зменшити кількість тепла, що утворюється під час обробки, або зменшити зношування інструменту.

Нанокompозитні шліфувальні круги містять у своєму складі наночастинки (наприклад, оксид алюмінію, карбід кремнію, алмаз тощо), які значно покращують механічні властивості круга, такі як міцність, твердість та зносостійкість. Завдяки цьому вони забезпечують більш точне і чисте шліфування з меншою кількістю дефектів на поверхні оброблюваного матеріалу. Наночастинки також сприяють рівномірному розподілу навантаження під час обробки, що знижує ризик утворення мікротріщин. Основними перевагами нанокompозитних шліфувальних кругів є:

7.1. Підвищена зносостійкість: Завдяки використанню наноматеріалів та сучасних композитів, такі круги служать довше і не вимагають частого замінення.

7.2. Висока точність обробки: Нанокompозити забезпечують високу точність шліфування, що важливо для фінішної обробки поверхонь.

7.3. Ефективність: зниження тепловиділення та рівномірний розподіл навантаження дозволяють збільшити продуктивність обробки.

7.4. Зменшення кількості дефектів: використання нанокompозитів сприяє зниженню ймовірності утворення мікротріщин та інших дефектів.

8. Використання нових методів шліфування.

Шліфування зі схрещеними осями абразивного інструменту та оброблюваної деталі [8]. Такий метод потребує використання спеціально профільованих шліфувальних кругів, що мають чорнову ділянку для зрізання основного припуску та калібрувальну ділянку, на якій формується остаточна точність. Впровадження нових способів такого шліфування з охоптом широкої номенклатури оброблюваних деталей різного призначення є суттєвим резервом інтенсифікації та підвищення ефективності процесів.

Шліфування зі схрещеними осями (або схрещені осі) – це техніка, при якій абразивний інструмент і оброблювана деталь мають різні осі обертання, що перетинаються під певним кутом. Це дозволяє досягти певних переваг у процесі шліфування:

8.1. Поліпшення якості обробки. Схрещення осей може забезпечити більш рівномірний розподіл абразивного навантаження по поверхні деталі, що допомагає досягти кращого фінішного результату.

8.2. Зменшення залишкових слідів. Така техніка дозволяє зменшити сліди від обробки на поверхні деталі, оскільки напрямки руху абразиву і деталі не збігаються.

8.3. Підвищення точності. Вона може бути корисною для шліфування деталей зі складними формами або для забезпечення високої точності обробки.

8.4. Зменшення теплових навантажень. Схрещені осі можуть допомогти розподілити тепло, що виникає під час шліфування, зменшуючи ризик перегріву деталі та шліфувального інструменту.

Ця техніка може використовуватися у різних типах шліфувальних машин і може бути налаштована залежно від вимог до обробки та специфікацій деталей.

Оскільки ця тема недостатньо висвітлена в літературі, то розглянемо процес шліфування на прикладі обробки двох торців деталі одночасно на двосторонньому торцешліфувальному верстаті моделі 3342АДО.

Для отримання калібрувальної ділянки на торці круга необхідна комбінована правка. Шліфувальні бабки 1 разом зі шліфувальними кругами 2 орієнтують на кут ν в вертикальній площині (рис. 1, а) і на кут γ – в горизонтальній (рис. 1, б). За допомогою спеціального пристрою 3 вся торцева поверхня правиться в площині, перпендикулярній осі обертання круга. Після цього алмазним олівцем 5, закріпленим на барабані кругової подачі 4 заготовок в зону обробки, правиться ділянка круга, суміжна із зовнішнім діаметром (рис. 1, в), в результаті чого отримують калібрувальну ділянку, яка на вході (ав) не бере участь у зрізуванні припуску і захищена напрямними 6 та 7 (рис. 1, г). Чорновий припуск зрізується на центральній ділянці вс. Під час шліфування деталь весь час переміщується в зону, що звужується, поступово зрізуючи припуск на обробку. Остаточна точність формується калібрувальною ділянкою cd на виході із зони обробки.

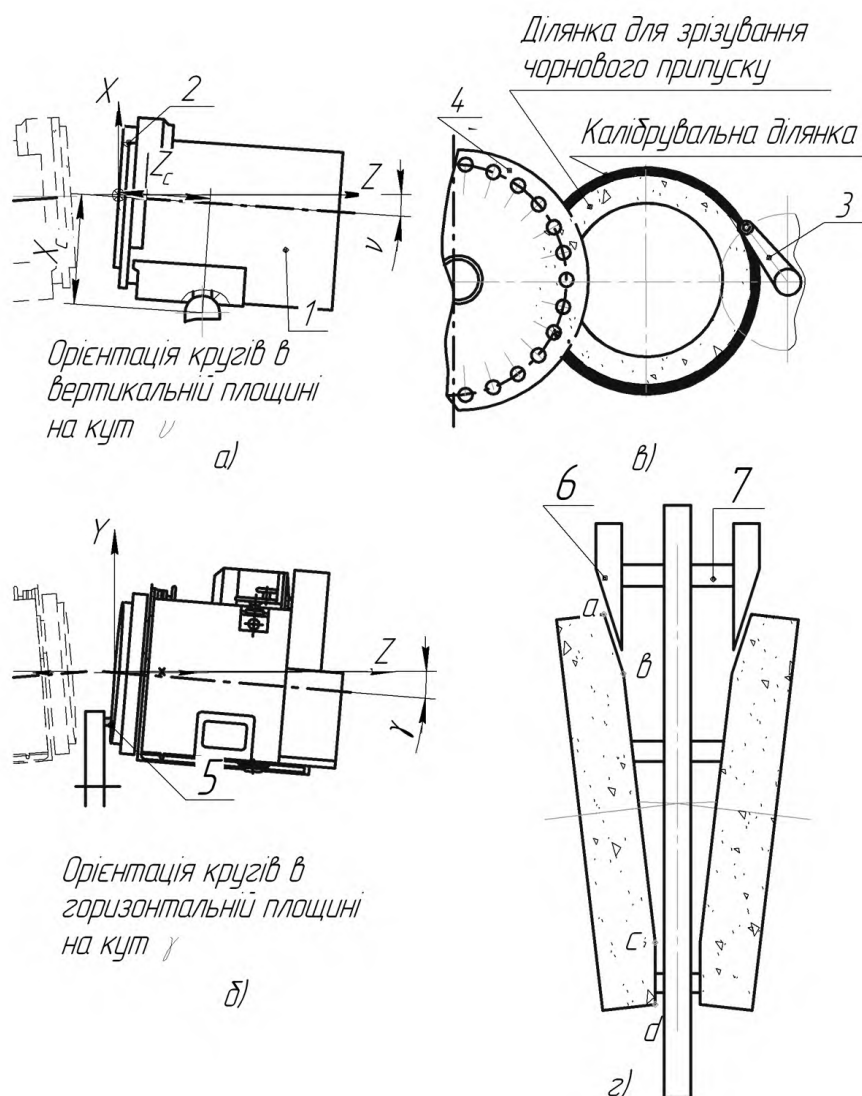


Рис. 1. Схема шліфування на двосторонньому торцешліфувальному верстаті 3342АДО зі схрещеними осями інструменту та оброблюваних деталей із використанням спеціально профільованих кругів

Висновки. У роботі проаналізовано застосування сучасних методів, верстатів, обладнання, інструменту та матеріалів таких як суперабразивні матеріали, інноваційні шліфувальні круги, системи шліфування з охолодженням рідким азотом, мінімальним змащенням (MQL), високошвидкісне шліфування (HSG), використання систем адаптивного керування при шліфуванні. Це забезпечить необхідну налаштованість процесу виробництва і буде підтримувати його стабільність, та стійку повторюваність кожної операції в передбачених технологічних режимах, нормах і умовах, а отже, сприятиме підвищенню рівня якості і конкурентоспроможності продукції.

Список використаних джерел

1. Vijoy, Bhattacharyya. *Modern Machining Technology: Advanced, Hybrid, Micro Machining and Super Finishing Technology* / Vijoy Bhattacharyya and Biswanath Doloi. – Academic Press, 2019. 780 с.
2. Бочков, В. М. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів : підручник / В. М. Бочков, Р. І. Сілін, О. В. Гаврильченко ; за ред. Р.І. Сіліна; Ін-т інноваційних технологій і змісту освіти МОН України. – Львів : Бескид Біт, 2008. – 448 с.
2. Міренський, І. Г. Основи технології машинобудування : навч. посіб. / І. Г. Міренський ; Харківська нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків : Тимченко А. М., 2008. – 256 с.
3. Основы теории тепловых явлений при шлифовании деталей машин: учеб. пособие / А. В. Якимов, Б. О. Ткаченко, С. Г. Зимин, А. А. Якимов, Н. И. Решетнев, А. М. Шинтасов, В. П. Ларшин. – Одесса : ОГПУ, 1997. – 272 с.
4. Основы теории резания материалов: підручник для студентів вищих навчальних закладів / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок та ін. ; під заг. ред. М. П. Мазура. – Львів : Новий Світ-2000, 2011. – 423 с.
5. Петраков, Ю. В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням / Ю. В. Петраков. – Київ : УкрНДІАТ, 2004. – 383 с.
6. Якість і продуктивність абразивно-алмазної обробки: навч. посібник / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков, А. А. Якимов. – Одеса : ОДПУ, 1999. – 212 с.
7. Паливода, Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навчально-методичний посібник / Ю. Є. Паливода, А. Є. Дячун, Р. Я. Лещук. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с.
8. Кальченко, В. В. Наукові основи ефективного шліфування зі схрещеними осями абразивного інструмента та оброблюваної деталі: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Кальченко Володимир Віталійович ; Національний технічний ун-т "Харківський політехнічний ін-т". – Харків, 2006. – 489 с.

References

1. Bhattacharyya, B., Doloi, B. (2019). *Modern Machining Technology: Advanced, Hybrid, Micro Machining and Super Finishing Technology*. Academic Press.
2. Bochkov, V.M., Silin, R.I., Gavrilchenko, O.V. (2008). *Rozrakhunok ta konstruiuvannya metal-orizalnykh verstativ [Calculation and design of metal-cutting machines]*. Beskyd Bit.
2. Mirenskyi, I.H. (2007). *Osnovy tekhnolohii mashynobuduvannya [Fundamentals of mechanical engineering technology]*. KhNAMG.
3. Yakimov, A.V., Tkachenko, B.O., Zimyn, S.G., Yakimov, A.A., Reshetnev, N.I., Shintasov, A.M., Larshin, V.P. (1997). *Osnovy teorii teplovykh yavlyshch pry shlifuvanni detalei mashyn [Fundamentals of the theory of thermal phenomena in the grinding of machine parts: a study guide]*. ODPU.
4. Mazur, M.P., Vnukov, Yu.M., Dobroskok, V.L. et al. (2010). *Osnovy teorii rizannia materialiv [Fundamentals of the theory of cutting materials]*.
5. Petrakov, Yu.V. (2004). *Avtomatychne upravlinnia protsesamy obrobky materialiv rizanniam [Automatic control of material processing processes by cutting]*. UkrNDIAT.
6. Yakymov, A.V., Novykov, F.V., Novykov, H.V., Yakymov, A.A. (1999). *Yakist i produktyvnist abrazyvno-almaznoi obrabotky [Quality and productivity of abrasive diamond processing]*. ODPU.
7. Palyvoda, Yu.Ye., Diachun, A.Ye., Leshchuk, R.Ya. (2019). *Instrumentalni materialy, rezhymy rizannia, tekhnichne normuvannya mekhanichnoi obrobky [Tool materials, cutting modes, technical standardization of mechanical processing]*. Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu.

8. Kalchenko, V.V. (2006). Naukovi osnovy efektyvnoho shlifuvannya zi skhreshchenymy osiamy abrazynovoho instrumenta ta obroblivanoi detali [Scientific basis of effective grinding with crossed axes of the abrasive tool and the processed part]. *Doctor's Dissertation*. Kharkiv.

Отримано 04.11.2024

UDC 621.923

**Volodymyr Kalchenko¹, Volodymyr Venzhega², Hennadiy Pasov³,
Antonina Kolohoida⁴, Bohdan Zavertannyi⁵, Yaroslav Kuzhelnyi⁶**

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector in scientific and pedagogical work
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).

E-mail: vykalchenko74@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9072-2976>
ResearcherID: [G-6752-2014](https://orcid.org/0000-0002-9072-2976). **Scopus Author ID:** [56644727300](https://orcid.org/0000-0002-9072-2976)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).

E-mail: vivenzhega@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8857-349X>
ResearcherID: [H-3560-2014](https://orcid.org/0000-0002-8857-349X). **Scopus Author ID:** [16510833000](https://orcid.org/0000-0002-8857-349X)

³PhD in Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Industrial Mechanical Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: genapasov@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>
ResearcherID: [H-4455-2014](https://orcid.org/0000-0001-7248-9085). **Scopus Author ID:** [57220212743](https://orcid.org/0000-0001-7248-9085)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).

E-mail: kolohoida@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1742-2686>
ResearcherID: [I-1118-2014](https://orcid.org/0000-0002-1742-2686). **Scopus Author ID:** [57222329484](https://orcid.org/0000-0002-1742-2686)

⁵PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building, Chernihiv
Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).

E-mail: zavertannyi@stu.cn.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0009-0001-7492-3663>
ResearcherID: [KHD-2575-2024](https://orcid.org/0009-0001-7492-3663). **Scopus Author ID:** [57219253414](https://orcid.org/0009-0001-7492-3663)

⁶PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: k.y.v.immortal@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5269-8557>
ResearcherID: [J-1127-2016](https://orcid.org/0000-0002-5269-8557)

MODERN METHODS AND TOOLS FOR IMPROVING GRINDING EFFICIENCY

In modern machine-building products, parts with high-precision cylindrical, conical, end, spherical, toroidal, helical, and curved surfaces are widely used for their service, the final quality of which is determined by finishing operations. The labor intensity of operations performed on grinding machines equipped with abrasive tools is constantly increasing in the total amount of labor intensity of processing and is on average 25-30 %, and in some industries up to 50% of the total labor intensity of processing. Therefore, it is very important to search for new and implement progressive existing methods of abrasive processing covering a wide range of machined parts for various purposes in order to increase the efficiency of processes. This has an important national economic significance for machine building, machine tool building, automotive, textile, timber industries, pipe rolling production and the energy industry of Ukraine.

In the work, research and systematization of the main factors affecting the accuracy of dimensions, shape and location deviations, surface roughness, hidden defects, process productivity during abrasive processing of a wide range of products were carried out. On the basis of the conducted analysis, it is proposed to use modern methods, equipment, tools and materials such as super abrasive materials, innovative grinding wheels, grinding systems with liquid nitrogen cooling, minimal lubrication (MQL), high-speed grinding (HSG), use of CNC systems.

The article is a review and informational publication.

Key words: abrasive processing; grinding; abrasive tool; grinding efficiency; dimensional accuracy; surface roughness.

Fig.: 1. References: 8.

Андрій Іванович Гречка¹, Олександр Леонідович Пузирьов²

¹кандидат технічних наук, завідувач кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Центральноукраїнський національний технічний університет (Кропивницький, Україна)

E-mail: angrel7@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1188-7412>

²кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри прикладної механіки
Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворті (Кропивницький, Україна)

E-mail: alpu@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2158-3714>

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА ЧЕРЕЗ ТЕХНОЛОГІЮ ХОЛОДНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ

У статті розглянуто питання оптимізації виробничих процесів на підприємствах шляхом впровадження технології холодного видавлювання, яка дозволяє знизити витрати, підвищити продуктивність та якість продукції. Оцінено економічні переваги цієї технології в порівнянні з традиційними методами. Розглянуто приклад впровадження холодного видавлювання для виготовлення гайок на машинобудівному підприємстві, де запропоновано перехід від токарної обробки до холодного видавлювання для зниження витрат та підвищення конкурентоспроможності продукції.

Ключові слова: холодне видавлювання; оптимізація виробництва; економічна ефективність; зниження витрат; підвищення якості; технології.

Табл.: 4. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Враховуючи сучасні виклики в промисловості, впровадження холодного видавлювання як альтернативи традиційним методам обробки металів є актуальним завданням. Ця технологія дозволяє суттєво зменшити витрати матеріалів, покращити механічні властивості виробів та знизити енергоспоживання. Її популярність зростає у зв'язку зі зростанням цін на енергоносії та сировину, а також з потребою підвищення конкурентоспроможності продукції на міжнародних ринках. Таким чином, дослідження ефективності холодного видавлювання, зокрема для виготовлення гайок на машинобудівних підприємствах, має важливе практичне значення.

Постановка проблеми. У сучасних умовах економічної глобалізації підприємства стикаються з високим рівнем конкуренції, що потребує впровадження ефективних технологій, здатних знизити витрати, підвищити якість продукції та оптимізувати виробничі процеси. Однією з таких технологій є холодне видавлювання, яке завдяки своїй ефективності й економічній доцільності стає популярним у машинобудівній та інших галузях промисловості. Водночас застосування цієї технології потребує теоретичного обґрунтування та аналізу її переваг у порівнянні з традиційними методами обробки металів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Практичні аспекти холодного видавлювання все частіше стають предметом досліджень економічної доцільності. Наприклад, у роботах [3; 4; 6] аналізується економія металу завдяки високій точності формування, що суттєво знижує відходи. За даними їхніх досліджень, на підприємствах, які впровадили холодне видавлювання, зменшення витрат на матеріали становить до 20 %, що є суттєвим аргументом на користь використання цієї технології у масовому виробництві. Додатково, дослідники [1; 2; 7] акцентують увагу на покращенні механічних властивостей деталей, виготовлених методом холодного видавлювання. Особливий інтерес становлять роботи, присвячені порівнянню холодного видавлювання з традиційними методами [2; 4–6], такими як механічне оброблення чи гаряче штампування. За результатами досліджень, холодне видавлювання демонструє кращі показники у зниженні енерговитрат і підвищенні точності виготовлення.

Попри численні переваги, залишається низка питань, які потребують додаткового вивчення. Зокрема, актуальною є проблема адаптації технології холодного видавлювання до потреб вітчизняної промисловості. Наразі бракує прикладних досліджень щодо впливу цього методу на виробництво виробів, таких як гайки та їм подібні. Також залишається невивченою економічна ефективність застосування холодного видавлювання у малих та середніх підприємствах машинобудівного сектору.

Підсумовуючи, сучасні дослідження підтверджують значний потенціал холодного видавлювання як енергоефективної та екологічної технології обробки металів. Водночас для подальшого поширення цієї технології у виробничій сфері необхідно зосередитися на прикладних аспектах її впровадження та розробити рекомендації, адаптовані до потреб конкретних галузей.

Метою статті є комплексна оцінка технології холодного видавлювання з точки зору її економічної доцільності, технічної ефективності та здатності знижувати витрати на виробництво. Оцінка ефективності холодного видавлювання здійснюється через порівняння витрат на традиційний метод обробки металу, такий як токарна обробка з витратами на холодне видавлювання. Також розглядаються основні фактори, що визначають ефективність цієї технології, та можливі шляхи її впровадження в промислове виробництво.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо оптимізацію виробничих процесів і зниження витрат на прикладі впровадження у виробництво на машинобудівному підприємстві Центральноукраїнського регіону виготовлення гайок S19 та S22 методом холодного видавлювання з одного каліброваного круга D17.5 замість токарної обробки з шестигранного токарного прокату 19 та 22 .

Для аналізу розглянуто економічні показники та існуючі обсяги виробництва гайок S19 та S22 для підприємства, що досліджується (Таблиці 1).

Таблиця 1 – Вхідні данні для розрахунку

Показники	S19	S22
Виробництво гайок на старому обладнанні, грн\од	2,86	3,39
Виробництво гайок методом холодного видавлювання	2,00	2,30
Річна потреба підприємства, од./рік	163000	95000
Тариф ел. енергія, грн без ПДВ	5,8	
Коефіцієнт загрузки обладнання на річний випуск, %	3	2
Середня потужність, од./хв	60	55
Мах потужність, од./хв, кг/хв	75	70
Потужність обладнання, кВт/год	120	
Заробітна плата, грн/міс	10000	
Норма робочого часу, год/рік	1695	
Вартість обладнання, \$	18413	
Курс НБУ на 30.12.2023	35,35	
Вартість обладнання, грн. без ПДВ	669339	
Термін амортизації, міс.	31	

Джерело: розроблено авторами.

Середня продуктивність за зміну може бути визначена за допомогою формули:

$$N_m = k_m \cdot N,$$

де k_m – кількість хвилин у зміні;

N – середня продуктивність, од./хв;

$$N_m = 480 \cdot 65 = 31200 \text{ од./день.}$$

Максимальна продуктивність за зміну розраховується за формулою:

$$N_{m.\max} = k_m \cdot N_{\max},$$

де N_{\max} – максимальна пропускна потужність, од./хв;

$$N_{m.\max} = 480 \cdot 80 = 38400 \text{ од./день.}$$

Норма робочого часу визначається приблизно – 85 % від норми часу в рік, з урахуванням тривалості простою.

Вартість технологічного обладнання являє собою:

$$K_c = K_o \cdot K_{\text{нбу}},$$

де K_o – вартість обладнання, \$;

$K_{\text{нбу}}$ – курс НБУ, \$.

Вартість послуги (змінні) визначається з такого виразу:

$$K_n = \frac{N \cdot 60 \cdot N_m}{P} + \frac{C_{з0} \cdot 12}{T_p} / (N \cdot k_m),$$

де P – Потужність обладнання, кВт/год;

$C_{з0}$ – заробітна плата, грн/міс;

T_p – норма робочого часу, год/рік

$$K_n = \frac{35 \cdot 60 \cdot 1,21}{160} + \frac{10\,000 \cdot 12}{1\,695} / (35 \cdot 1,21) = 1,95, \text{ грн.}$$

Економія, отримана при виготовленні гайки S19

$$E_{19} = C_{\text{токарна}19} - C_{\text{хва}19}, \text{ грн/од.},$$

де $C_{\text{токарна}}$ – гайка, виготовлена токарною обробкою, грн;

$C_{\text{хва}}$ – гайка, виготовлена холодним видавлюванням, грн.

$$E_{19} = 2,86 - 2,00 = 0,86, \text{ грн/од.}$$

Економія, отримана при виготовленні гайки S22

$$E_{22} = C_{\text{токарна}22} - C_{\text{хва}22}, \text{ грн/од.},$$

де $C_{\text{токарна}}$ – гайка, виготовлена токарною обробкою, грн;

$C_{\text{хва}}$ – гайка, виготовлена холодним видавлюванням, грн.

$$E_{22} = 3,39 - 2,30 = 1,09, \text{ грн/од.}$$

Розраховуємо економію на випуск гайки S19:

$$E_{p19} = E_{m19} \cdot C_{об}, \text{ грн/рік},$$

де $C_{об}$ – потреба для підприємства, що досліджується, од./рік.

$$E_{p19} = 0,86 \cdot 163\,000 = 140\,180,00, \text{ грн/рік.}$$

Розраховуємо економію на випуск гайки S22:

$$E_{p22} = E_{m22} \cdot C_{об}, \text{ грн/рік},$$

де $C_{об}$ – потреба для підприємства, що досліджується, од./рік.

$$E_{p22} = 1,09 \cdot 95\,000 = 103\,550,00, \text{ грн/рік.}$$

Розраховуємо термін окупності інвестиційних вкладень:

$$T_o = \frac{K_r}{E_{p19} + E_{p22}}, \text{ років},$$

де K_r – вартість обладнання, грн.

$$T_o = \frac{716\,250}{243\,730} = 2,9 \text{ років.}$$

Завантаження лінії визначаємо за формулою:

$$Z_l = \frac{\left(\frac{C_{об} - 12}{k_m} \right)}{N_{\max}} / \frac{(T_p \cdot 60)}{12}, \%$$

$$Z = \frac{\left(\frac{36\,477 - 12}{1,21} \right)}{50} / \frac{1695 \cdot 60}{12} = 0,59, \%$$

Для нормального функціонування та впровадження нових технологій у виробництво було зроблено розрахунки виготовлення гайок для потреб даного машинобудівного підприємства (табл. 2 та 3).

Таблиця 2 – Порівняння статей витрат гайки - S19

№	Найменування статей затрат	Од. вимірювання	Гайка S19 (Холодне видавлювання)	Гайка S19 (Токарна обробка)	Відхилення	Економія на річний випуск
						163 000
1	Основні матеріали	грн	0,88	1,490	0,614	100 108,08
2	Допоміжні матеріали	грн	0,180	0,230	0,050	8150,00
3	Зворотні матеріали	грн	-0,020	-0,038	-0,018	-2934,00
5	Транспортно-заготівельні затрати (стр.1+стр.2+стр.3)*3%	грн	0,000	0,052	0,052	8410,80
6	Енергія на виробництво	грн	0,250	0,440	0,190	30 970,00
7	Основна Зарплата	грн	0,190	0,209	0,019	3097,00
8	Допоміжні зарплати	грн	0,124	0,125	0,002	309,70
9	Начислення на ФОТ	грн	0,069	0,074	0,005	749,47
10	Кошти на виготовлення інструменту	грн	0,300	0,250	-0,050	-8150,00
11	Брак	грн	0,030	0,027	-0,003	-489,00
12	Змінні матеріальні витрати разом	грн	2,00	2,86	0,86	140 222,05

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 3 – Порівняння статей витрат гайки - S22

№	Найменування статей затрат	Од. вимірювання	Гайка 22 (Холодне видавлювання)	Гайка 22 (Токарна обробка)	Відхилення	Економія на річний випуск
						95 000
1	Основні матеріали	грн	1,18	2,000	0,820	133 581,76
2	Допоміжні матеріали	грн	0,180	0,230	0,050	8150,00
4	Зворотні матеріали	грн	-0,020	-0,050	-0,030	-4890,00
5	Транспортно-заготівельні затрати (стр.1+стр.2+стр.3)*3%	грн	0,000	0,067	0,067	10 904,70
6	Енергія на виробництво	грн	0,250	0,450	0,200	32 600,00
7	Основна Зарплата	грн	0,190	0,209	0,019	3097,00
8	Допоміжні зарплати	грн	0,124	0,125	0,002	309,70
9	Начислення на ФОТ	грн	0,069	0,074	0,005	749,47
10	Кошти на виробітку інструменту	грн	0,300	0,250	-0,050	-8150,00
11	Брак	грн	0,030	0,040	0,010	1548,50
12	Змінні матеріальні витрати разом	грн	2,30	3,39	1,09	103 684,71

Джерело: розроблено авторами.

Отже, у зв'язку з викладеним вище, впровадження переходу з токарної обробки на холодне видавлювання є економічно доцільним через низькі витрати на закупівлю металопрокату, запропоновані зміни дозволять підвищити конкурентоспроможність цього виду продукції за рахунок зниження змінних витрат нового товару. Для впровадження цих технологій у виробництво не потрібен час на оптимізацію процесів. Також непотрібно буде готувати оператора до управління.

Згідно з розрахунками, застосування холодного видавлювання дозволяє зменшити витрати на матеріали, енергію та робочу силу, що призводить до значної економії. Розрахунки показують, що після впровадження цієї технології термін окупності становить приблизно 2,9 року.

Таблиця 4 – Розрахунок економії при впровадженні холодного видавлювання

Показник	Токарна обробка	Холодне видавлювання	Економія (%)
Витрати на матеріали (грн/рік)	500 000	450 000	10
Витрати на енергію (кВт·год/рік)	120 000	70 000	41,7
Витрати на обслуговування (грн/рік)	30 000	15 000	50
Загальні витрати (грн/рік)	650 000	535 000	17,7

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Згідно з проведеними дослідженнями, технологія холодного видавлювання є економічно доцільною та ефективною для підприємств, що спеціалізуються на виготовленні металевих виробів, таких як гайки та інші подібні деталі. Вона дозволяє знизити витрати на матеріали та енергію, зменшити кількість трудових операцій і підвищити якість кінцевої продукції.

Розрахунки підтверджують, що впровадження холодного видавлювання є економічно вигідним для підприємств, що здійснюють серійне виробництво, і що термін окупності інвестицій у таку технологію становить близько 2,9 року. Ця технологія є оптимальним вибором для сучасних виробничих підприємств, які прагнуть зменшити витрати, підвищити конкурентоспроможність та забезпечити довгострокове зростання на ринку.

Таким чином, технологія холодного видавлювання є потужним інструментом для підвищення ефективності виробництва, що дозволяє знижувати витрати на сировину, енергію та трудові ресурси, а також забезпечує високу точність і міцність виробів. Впровадження цієї технології на підприємствах сприяє не лише економічній вигоді, а й підвищенню якості продукції, що своєю чергою позитивно впливає на імідж підприємства.

Доведено, що впровадження у виробництво запропонованого інноваційного проекту, пов'язаного зі зміною методу виготовлення гайки S19 та S22 з токарної обробки на холодне видавлювання, забезпечить зниження собівартості виготовлення продукції на 40-45 % та зможе стати суттєвою конкурентною перевагою продукції на наявних та нових ринках збуту.

Список використаних джерел

1. Виготовлення заготовок для корпусів коннекторів холодним видавлюванням / В. М. Левченко, Т. Л. Коворотний, В. І. Кузьменко, В. Я. Даниленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – 2017. – № 35 (1257). – С. 34-37.
2. Грудкіна, Н. Математичне моделювання процесів холодного видавлювання зі складною конфігурацією інструменту / Н. Грудкіна, О. Марков // Технічні науки та технології. – 2020. – № 3(21). – С. 89-97.
3. Калюжний, В. Л. Прямое холодное выдавливание с раздачей профилей из сталей / В. Л. Калюжний, В. Н. Горностай, А. С. Запорожченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – 2012. – № 47 (953). – С. 110-115.
4. Калюжний, В. Л. Визначення зусилля прямого холодного видавлювання з роздачею прямокутних профілів / В. Л. Калюжний, О. В. Калюжний В. М. Горностай // Обработка материалов давлением : Сборник научных трудов. – 2009. – № 1 (20). – С. 23-27.
5. Кротенко, Г. А. Аналіз процесів видавлювання в умовах тривимірної течії металу / Г. А. Кротенко. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – 20 с.
6. Кузьменко, В. І. Використання методу скінченних елементів для дослідження процесу прямого холодного видавлювання стрижневих деталей [Електронний ресурс] / В. І. Кузьменко, А. І. Целуйко // 36. наук. праць наук.-техн. Міжнар. конф. «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском у машинобудування та металургії». – Харків, 2015. – № 47. – Режим доступу: https://www.kpi.kharkov.ua/archive/MicroCAD/2015/S6/2015_5_Tezisy_sbornik_part1_2015_336.pdf.
7. Серета, Б. П. Обработка металів тиском : навч. посіб. / Б. П. Серета. – Запоріжжя : Видавництво Запорізької державної академії, 2009. – 343 с.

References

1. Levchenko, V.M., Kovorotniy, T.L., Kuzmenko, V.I., Danilenko, V.Ya. (2017). Vyhotovlennia zahotovok dlia korpusiv konnektoriv kholodnym vydavliuvanniam [Production of blanks for connector housings by cold extrusion]. *Visnyk NTU «KhPI». Serii: Innovatsiini tekhnolohii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii – Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment for processing materials in mechanical engineering and metallurgy*, (35(1257)), 34–37.
2. Grudkina, N., Markov, O. (2020). Matematychnе modeliuвання protsesiv kholodnoho vydavliuvannia zi skladnoiu konfihuratsiieiu instrumentu [Mathematical modeling of cold extrusion

processes with complex tool configuration]. *Tekhnichni nauki ta tehnologii – Technical sciences and technologies*, (3(21)), 89–97.

3. Kalyuzhnyi, V.L., Gornostay, V.N., Zaporozhchenko, A.S. (2012). Priamoe kholodnoe vydavlyvanye s rozdachei profylei yz stalei [Direct cold extrusion with distribution of steel profiles]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiiakh – Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, (47 (953)), 110–115.

4. Kalyuzhnyi, V.L., Kalyuzhnyi, O.V., Gornostay, V.M. (2009). Vyznachennia zusyillia priamoho kholodnoho vydavliuvannia z rozdacheiu priamokutnykh profiliv [Determination of the force of direct cold extrusion with the distribution of rectangular profiles]. *Obrabotka materialov davleniem – Processing of materials by pressure: Collection of scientific works*, (1(20)), 23–27.

5. Krotenko, G.A. (2011). *Analiz protsesiv vydavliuvannia v umovakh tryvymirnoi tekhii metalu [Analysis of extrusion processes in terms of three-dimensional metal flow]*. NTU "KhPI".

6. Kuzmenko, V.I., Celujko, A.I. (2015). Vykorystannia metodu skinchenykh elementiv dlia doslidzhennia protsesu priamoho kholodnoho vydavliuvannia stryzhnevnykh detalei [Using the finite element method to study the process of direct cold extrusion of rod parts]. *Zbirnyk nauk. prats nauk.-tekhn. Mizhnar. konf. «Resursozberezhennya ta energoefektivnist' procesiv ta obladnannya obrobki tiskom u mashinobuduvannya ta metalurgii» – Collection of scientific works of scientific and technical. International conference "Resource saving and energy efficiency of processes and equipment for pressure treatment in mechanical engineering and metallurgy"*, 47. https://www.kpi.kharkov.ua/archive/MicroCAD/2015/S6/2015_5_Tezisy_sbornik_part1_2015_336.pdf.

7. Sereda, B.P. (2009). *Obrobka metaliv tyskom [Metal processing by pressure]*. Vydavnytstvo Zaporizkoi derzhavnoi akademii.

Отримано 20.12.2024

UDC621.7

Andrii Hrechka¹, Oleksandr Puzyrov²

¹PhD in Engineering, Associate Professor.

Head of the department of mechanical engineering, mechatronics and robotics

Central Ukrainian National Technical University (Kropyvnytskyi, Ukraine)

E-mail: angre17@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1188-7412>

²PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Applied Mechanics

Robert Elworthy Institute of Economics and Technology (Kropyvnytskyi, Ukraine)

E-mail: alpu@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2158-3714>

OPTIMIZATION OF PRODUCTION THROUGH COLD EXTRUSION TECHNOLOGY TO IMPROVE PRODUCT QUALITY

The article focuses on optimizing production processes through the implementation of cold extrusion technology, which enables cost reduction, productivity improvement, and product quality enhancement. The study compares the economic advantages of cold extrusion with traditional metal processing methods. Using the example of nut production at a machine-building enterprise, the article examines the transition from lathe machining to cold extrusion, highlighting significant cost reductions and increased product competitiveness. The relevance of the research is driven by contemporary industrial challenges.

The study demonstrates that cold extrusion, as an alternative to traditional metal processing methods, substantially reduces material costs, improves the manufacturing properties of products, and decreases energy consumption. The growing popularity of this technology is attributed to rising energy and raw material prices, as well as the need to enhance product competitiveness in global markets.

An analysis of scientific research and publications on cold extrusion reveals that, despite its numerous advantages, several unresolved issues require further investigation. In particular, the adaptation of cold extrusion technology to the needs of domestic industries remains a significant challenge. At present, there is a lack of applied studies exploring the impact of this method on the production of nuts and similar components.

The aim of the article is to provide a comprehensive assessment of cold extrusion technology in terms of its economic feasibility, technical efficiency, and potential to reduce production costs. The evaluation was conducted by comparing the costs of traditional metal processing methods, such as lathe machining, with those of cold extrusion.

The results of the study indicate that cold extrusion technology is economically viable and technically effective for enterprises specializing in the manufacture of metal products, such as nuts and other similar components. This technology contributes to reduced material and energy costs, minimizes labor-intensive operations, and ensures improved quality of the final products.

Keywords: cold extrusion, production optimization, economic efficiency, cost reduction, quality improvement, technologies.

Table: 4. **References:** 7.

**Богдан Сергійович Завертанний¹, Геннадій Володимирович Пасов²,
Мирослав Сергійович Завертанний³, Володимир Іванович Венжега⁴,
Віра Петрівна Мурашківська⁵**

¹ доктор філософії, старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка», ТОВ «ПЕТ Технолоджиз» (Чернігів, Україна)
E-mail: zavertannyi@stu.cn.ua. ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7492-3663>. ResearcherID: [KHD-2575-2024](https://orcid.org/0009-0001-7492-3663)

² кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: genapasov@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>. ResearcherID: [H-4455-2014](https://orcid.org/0000-0001-7248-9085)

³ кандидат технічних наук, науковий співробітник
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України (Київ, Україна)
E-mail: zavertannyi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8415-8555>

⁴ кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vivenzhega@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8857-349X>. ResearcherID: [H-3560-2014](https://orcid.org/0000-0002-8857-349X)

⁵ старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vmurashkovska@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0556-8709>. ResearcherID: [G-9757-2016](https://orcid.org/0000-0002-0556-8709)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗТЯГУ ПОЛІМЕРНИХ ОБОЛОНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Технології сучасного виробництва полімерних оболонок для рідин мають прогресивний характер, що дає можливість гарантувати високу якість, міцність, екологічність та підвищення механічних характеристик полімерних оболонок для рідин, що є важливим не тільки для харчової, але також хімічної промисловості. Однак є потреба в моделюванні нових типів і конструкцій оболонок, врахування розподілу матеріалу під час формування оболонок та вплив цього на механічні характеристики. Метою роботи є проведення моделювання розтягу полімерних оболонок з поліетилентерефталата під дією внутрішнього тиску та оптимізація процесу проектування полімерних оболонок. У роботі досліджено вплив розподілу матеріалу полімерних оболонок на опір внутрішньому тиску, експериментально досліджено процес руйнування полімерних оболонок під дією внутрішнього тиску та проведено комп'ютерне моделювання процесу. Дослідження проводилися на дослідно-виробничій базі ТОВ «ПЕТ Технолоджиз».

Ключові слова: полімерна оболонка; поліетилентерефталат; моделювання; механічні характеристики; розтяг.
Рис.: 6. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. У процесі виробництва полімерних оболонок з поліетилентерефталата методом пневматичного формування важливим фактором є екологічна складова виробництва. Досить поширеним напрямом підвищення екологічності виробництва є вторинна переробка поліетилентерефталата [2-5], але також екологічності виробництва можливо досягти зменшенням кількості відходів і собівартості упаковки. Цього ефекту можливо досягти зменшенням ваги (товщини оболонки з поліетилентерефталата). Для проведення аналізу можливості використання полегшених зразків оболонок необхідно проводити лабораторні дослідження фізичних зразків, або проводити моделювання впливу внутрішнього тиску на поведінку оболонки. Тому отримання результатів математичного моделювання поведінки оболонок, отримання результатів під час лабораторних досліджень, проведення аналізу різності показників та зіставлення результатів моделювання і лабораторних досліджень для подальшого використання у виробництві є актуальною задачею.

Постановка проблеми. У процесі проектування полімерних оболонок неможливо покладатися тільки на досвід конструктора, який використовуючи свої знання у сфері проведення робіт створює той чи інший вид продукції. Для перевірки відповідності продукції необхідним специфікаціям (як приклад – внутрішній тиск, який витримує полімерна оболонка до повної руйнації) проводиться виготовлення прототипів [1] (фізичних

зразків пресформи), проводиться дослідне пневматичне формування оболонок та їх подальше випробування, лабораторні дослідження, можлива оптимізація конструкцій і внесення змін до документації. Це досить тривалий і трудомісткий процес. Для його скорочення, або повного виключення з процесу досліджень, досить логічною є ідея застосувати методи комп'ютерного моделювання поведінки полімерних оболонок. Як приклад проведення моделювання поведінки під дією тиску методом скінчених елементів.

Проведення порівняння результатів лабораторних досліджень і результатів моделювання дозволить зробити висновки щодо адекватності результатів моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [2; 3] розглядається екологічний аспект переробки полімерних оболонок з поліетилентерефталата, але не розглянуто питання можливості зменшення кількості відходів. Було обговорено основні особливості використання ПЕТ в пакувальній промисловості. У дослідженні [4] оцінювалися явища деградації, які відбуваються у життєвому циклі поліетилентерефталата. Розкриваються питання стійкості до атмосферних чинників поліетилентерефталата.

Механічні властивості полімеру розглядаються у [5-6], але вони розглядаються для волокна, виготовленого з відходів оболонок [5] з поліетилентерефталата у будівництві, а в [6] розглядається процес деградації полімеру. Автори у [7] досліджують екологічні аспекти впливу мікропластику на живі організми. Використання полімерних оболонок з поліетилентерефталата розглянуто у [8].

Але у роботах не розглянуте проєктування полімерних оболонок, дослідження механічних характеристик полімерних оболонок та можливості зменшення їхньої ваги в разі використання як упаковки.

Мета статті. Проведення лабораторних досліджень фізичних зразків полімерних оболонок, отриманих методом прототипування на виробничому обладнанні, виконання математичного моделювання поведінки полімерних оболонок під тиском та порівняння результатів дадуть нам інформацію щодо адекватності результатів математичного моделювання в зіставленні з дослідженням фізичних зразків. Також потрібно провести дослідження впливу розподілу полімерного матеріалу (товщини полімерної плівки) на механічні властивості полімерної оболонки.

Використання такого підходу дозволить забезпечити покращення якості розподілення матеріалу, міцності оболонок при зменшенні їхньої ваги та зменшенні матеріальних затрат на проведення дослідів.

Виклад основного матеріалу. Під час використання полімерних оболонок для харчових рідин, для довготривалого їх збереження, в оболонки додають надлишковий тиск з використанням азоту, або вуглекислого газу (газовані напої). Під час фасування та зберігання напоїв на оболонку діє тиск, який може досягати 8 бар (при сильному нагріванні рідин, насичених вуглекислим газом). При неправильній геометрії оболонки, нерівномірному розподілу матеріалу з плином часу може відбуватися руйнація оболонки та втрата продукту, що призводить до фінансових та репутаційних втрат виробника.

Для визначення механічних характеристик спроектованих оболонок проводиться процес прототипування – виготовлення тестового зразка пресформи для формування оболонок, пневматичне формування експериментальних партій полімерних оболонок, проведення лабораторних досліджень, корегування розподілу матеріалу по тілу оболонки, повторні формування та лабораторні досліді.

Для виконання дослідження процесу розтягу полімерних оболонок на базі провідного підприємства, передове підприємство у сфері виготовлення обладнання для формування полімерних оболонок та виконання їх досліджень, ТОВ «ПЕТ Технолоджиз» [1] було проведено виготовлення прототипного зразка прес-форми, сформована пробна партія полімерних оболонок та проведені лабораторні дослідження оболонок під дією внутрішнього тиску. Усі дослідження проводилися на обладнанні лабораторії ТОВ «ПЕТ Технолоджиз».

Опираючись на досвід налагоджувальників пневмоформуючого обладнання, на видувній машині УПФ-30 було сформовано першу дослідну партію полімерних оболонки. На обладнанні лабораторії, а саме на тестері внутрішнього тиску РРТ3000, було проведено дослід на внутрішній тиск, витримуваний оболонками до повного руйнування. На рис. 1 графічно показано внутрішній тиск у бар, при якому відбулася руйнація оболонки, по вибірці з 10 зразків.

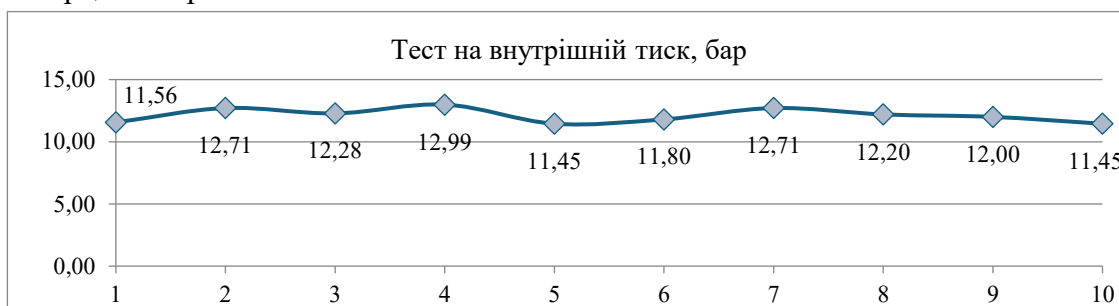


Рис. 1. Результати тестування полімерних оболонки на внутрішній тиск до їх повної руйнації за умови «оптимального» розподілення полімерного матеріалу
Джерело: розроблено авторами.

На рис. 2 показано руйнацію зразків. Опираючись на внутрішню специфікацію ТОВ «ПЕТ Технолоджиз» та досвід попередніх лабораторних досліджень, зроблено висновки, що руйнація зразків відповідає необхідним вимогам до полімерних оболонки такого типу, а саме – руйнація відбулася по боковій стінці, характер розривів відповідає нормальному розподіленню полімерного матеріалу по тілу пляшки.

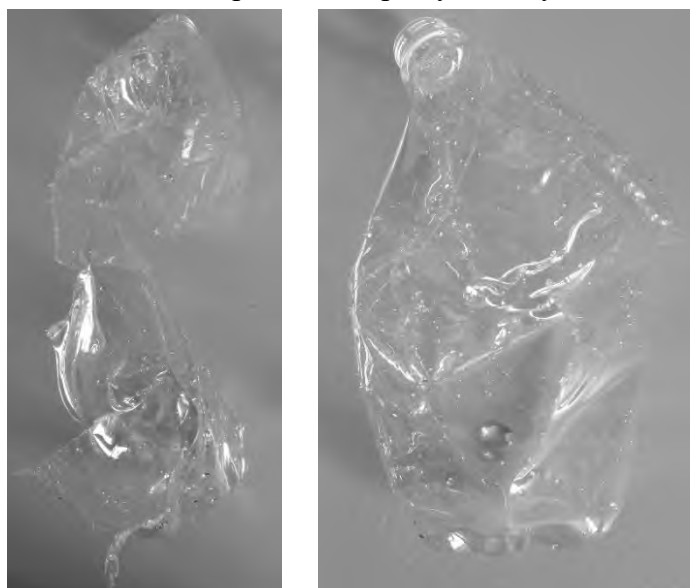


Рис. 2. Місця руйнування полімерних оболонки за умови «оптимального» розподілення полімерного матеріалу
Джерело: розроблено авторами.

Після проведення досліджень та аналізу даних було відредаговано 3D-модель оболонки. Провівши виміри товщини стінок полімерної оболонки та визначивши закономірності в розподіленні матеріалу, були внесені корективи товщини стінок 3D-моделі. Товщина матеріалу в литниковій зоні – 1,5 мм (литникова зона – місце на преформі, яке утворюється після виготовлення преформи та слугує орієнтиром місця дії розтягуючого штоку пневмоформувальної машини).

Наступним кроком стало проведення математичного моделювання розтягу моделі полімерної оболонки методом скінчених елементів у середовищі SOLIDWORKS Simulation [9]. Проведено розподіл навантажень на оболонку з врахуванням тиску руйнації фізичних зразків 12 бар. Кількість вузлів сітки становить 588 396, кількість елементів 300 786. На рис. 3, *а* показано досліджувану 3D-модель, на рис. 3, *б* – сітку скінчених елементів. Розрахунок проводився з урахуванням великих переміщень та деформацій. Матеріал оболонки – поліетилентерефталат.

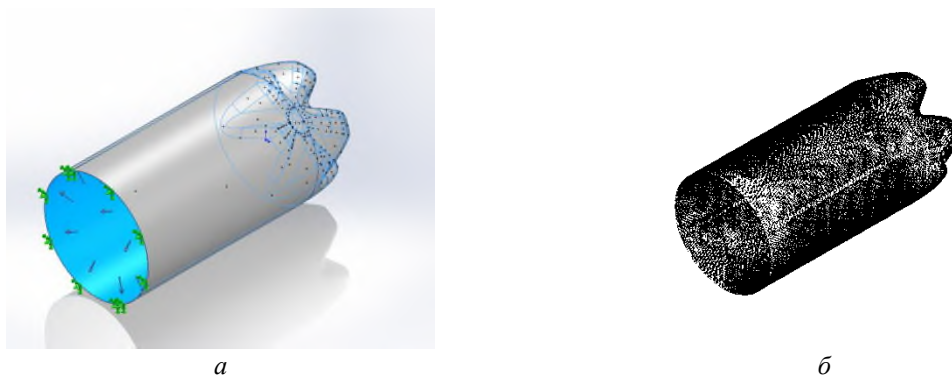


Рис. 3. Параметри моделювання методом скінчених елементів:

а – фіксація елемента та вказання навантажень; *б* – сітка скінчених елементів
Джерело: розроблено авторами.

Результати моделювання наведені на рис. 4. Рисунок 4, *а* показує напруження, які виникали в полімерній оболонці, рис. 4, *б* – переміщення, а рис. 4, *в* – деформації, які виникли під дією внутрішнього тиску.

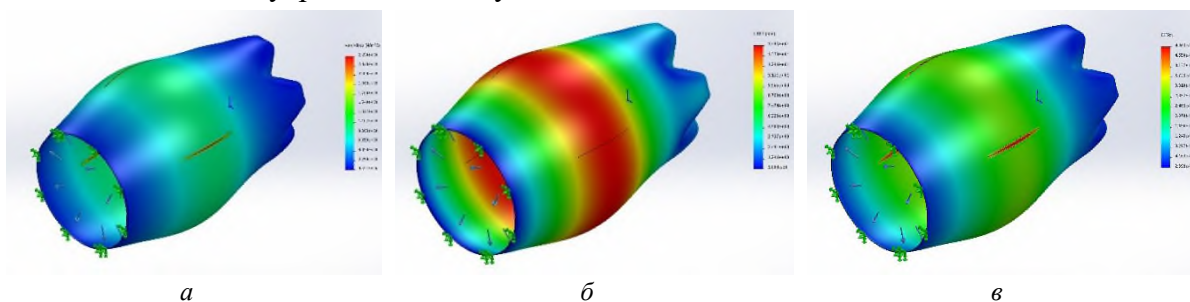


Рис. 4. Напруження (*а*), переміщення (*б*) та деформації (*в*), отримані в результаті моделювання

Джерело: розроблено авторами.

Відповідно до результатів моделювання, руйнація оболонки відбулася під тиском 12 бар, що відповідає результатам експериментальних досліджень. Тобто модель і дослід підтвердили свою адекватність.

Наступним кроком була зміна товщина матеріалу в литниковій зоні до товщини 3 мм. Після проведення аналогічних досліджень з тими самими умовами щодо матеріалу і тиску в середовищі SOLIDWORKS Simulation результати моделювання були аналогічні вказаним.

Надалі проведено підбір режимів пневмоформування та виконано пробну партію полімерних оболонок з аналогічним розподіленням матеріалу до попереднього дослідження, окрім товщини матеріалу в литниковій зоні (3 мм замість 1,5 мм). На обладнанні лабораторії, на тестері внутрішнього тиску PPT3000, було проведено повторний дослід на внутрішній тиск, витримуваний оболонками до повного руйнування. На рис. 5 графічно показано внутрішній тиск у бар, при якому відбулася руйнація оболонки, по вибірці з 10 зразків.

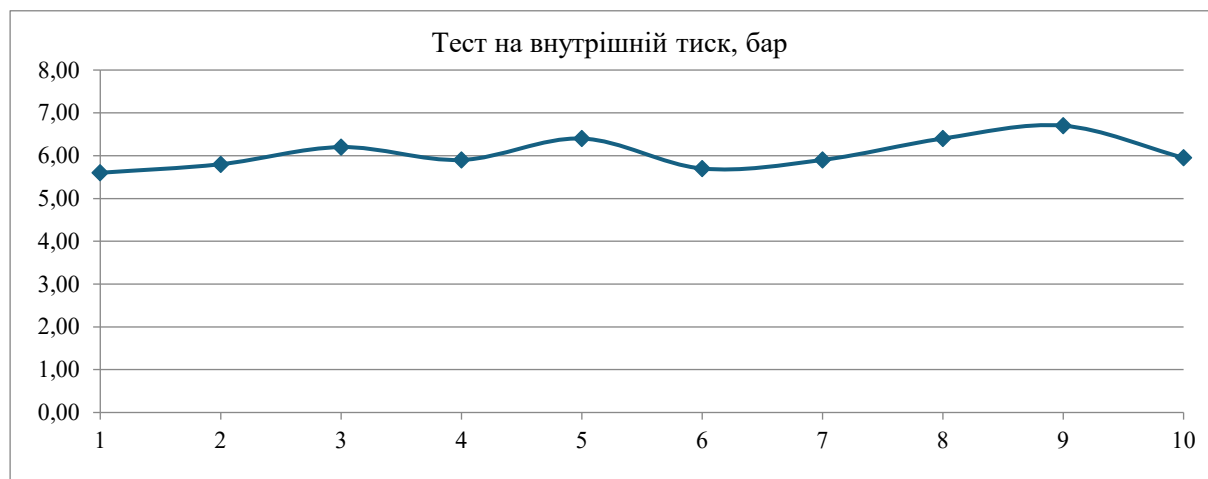


Рис. 5. Результати тестування полімерних оболонок на внутрішній тиск до їх повної руйнації за умови «неоптимального» розподілення полімерного матеріалу
Джерело: розроблено авторами.

На рис. 6 показано руйнацію зразків. Руйнування матеріалу відбулося в литниковій зоні, що є недопустимим за внутрішньою специфікацією.



Рис. 6. Місця руйнування полімерних оболонок за умови «неоптимального» розподілення полімерного матеріалу
Джерело: розроблено авторами.

У цьому випадку результати моделювання і результати лабораторних досліджень реальних полімерних оболонок суперечать один одному. Впливає невідповідність механічних властивостей полімерних оболонок з поліетилентерефталата фізичних зразків у порівнянні з результатами моделювання. Це може свідчити про ідеалізацію механічних властивостей полімеру незалежно від товщини у програмному продукті SOLIDWORKS Simulation. Реальні ж лабораторні дослідження показали збільшення крихкості полімеру зі збільшенням його шару.

Висновки. У результаті проведених експериментальних досліджень отримано реальну характеристику розподілу полімерного матеріалу (поліетилентерефталат) під час пневмоформування оболонки, що дає можливість відійти від ідеалізації розподілу полімерного матеріалу під час математичного моделювання процесу розтягу та оптимізувати процес проектування полімерних оболонок. Виконано моделювання розтягу полімерних оболонок під дією внутрішнього тиску методом скінчених елементів, проведено порівняння експериментальних результатів із результатами моделювання.

Визначено недостовірність результатів моделювання методом скінчених елементів при підвищених параметрах товщини матеріалу оболонки. У місці литникової зони при підвищеній товщині матеріалу відбувається першочергове руйнування матеріалу без його розтягу, що неможливо виявити під час моделювання методом скінчених елементів. Можливою причиною цього може бути ідеалізація механічних характеристик полімерного матеріалу програмою незалежно від товщини матеріалу.

Враховуючи, що матеріальні затрати на проведення експериментальних досліджень поведінки полімерних оболонок досить значні, а проведення математичного моделювання поведінки полімерних оболонок під тиском на порядок дешевше, то доопрацювання моделі побудови сітки для методу скінчених елементів, а саме зміни механічних характеристик матеріалу залежно від товщини, суттєво вплине як на час виконання досліджень, так і на їхню собівартість.

Список використаних джерел

1. ПЕТ Технологізація (2024, 16 травня). Інновації у пакуванні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pet-eu.com/uk/zahodi/pet-technologies-vzyali-uchast-u-konferentsiyi-innovatsiyi-u-pakuvanni>.
2. Дослідження безпечності використання ПЕТ пляшок із вторинної сировини для пакування харчових продуктів / С. Павлюк, Т. Філінська, І. Суха, А. Філінська // Технічні науки та технології. – 2023. – № 4 (34). – С. 188–194. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4\(34\)-188-194](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-4(34)-188-194).
3. Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review / Benyathiar Patnarin, Kumar Pankaj, Carpenter Gregory, Brace John, Mishra, Dharmendra // *Polymers (Basel)*. – 2022. – № 14. – P. 2366. DOI: [10.3390/polym14122366](https://doi.org/10.3390/polym14122366).
4. Nisticò, Roberto. Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry / Roberto Nisticò // *Polymer Testing*. – 2022. – Vol. 90. – 106707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2020.106707>.
5. A Literature Review on Mechanical Properties of Waste PET Bottle Based Fibre / Somwanshi Devendra Sharma, Vijay Prakash Sharma, Sikha Sharma, Kalpit Jain // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2022. – 1084. DOI [10.1088/1755-1315/1084/1/012069](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1084/1/012069).
6. Assessment of the Mechanical Properties of Pet Polymer Material from Recovered Plastic Bottles / Irene Villafañe, Colin Keogh, Thomas Curran, Emmanuel Reynaud // *Present Environment and Sustainable Development*. – 2018. – № 12. – Pp. 203-214. DOI: [10.2478/pesd-2018-0016](https://doi.org/10.2478/pesd-2018-0016).
7. Olam, Mikail. Mechanical and Thermal Properties of HDPEPET Microplastics, Applications, and Impact on Environment and Life / Olam Mikail // *Advances and Challenges in Microplastics*. – 2023. – Pp. 1-25. DOI: [http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.110390](https://doi.org/10.5772/intechopen.110390).
8. Verkhivker, Ya. Use of consumer polymer C-PET containers in food production technologies / Yakov Verkhivker, Walery Okulicz-Kozaryn, Olena Myroshnichenko // *Technology audit and production reserves*. – 2023. – № 1. – Pp. 27-30. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.275074>.
9. Ворошук, В. Я. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем: навч. посіб. / В. Я. Ворошук, Т. М. Вітенько. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2021. – 164 с.

References

1. PET Technologies. (2024, May 16). *Innovations in packaging [Innovatsii u pakuvanni]*. <https://pet-eu.com/uk/zahodi/pet-technologies-vzyali-uchast-u-konferentsiyi-innovatsiyi-u-pakuvanni>.
2. Pavliuk, S., Filinska, T., Sukha, I., & Filinska, A. (2023). Research on the safety of using pet bottles from secondary raw materials for food packaging [Doslidzhennia bezpechnosti vykorystannia PET pliashok iz vtorynnoi syrovyny dlia pakuvannia kharchovykh produktiv]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (4(34)), 188–194.
3. Benyathiar, P. & Kumar, P. & Carpenter, G. & Brace, J. & Mishra, D. (2022). Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review. *Polymers*, 14, 2366. DOI: [10.3390/polym14122366](https://doi.org/10.3390/polym14122366).
4. Nisticò, R. (2020). Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. *Polymer Testing*, 90, 106707. DOI: [10.1016/j.polymeresting.2020.106707](https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2020.106707).
5. Somwanshi, D., Sharma, V. P., Sharma, S. & Jain, K. (2022). A Literature Review on Mechanical Properties of Waste PET Bottle Based Fibre. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1084, 012069. DOI: [10.1088/1755-1315/1084/1/012069](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1084/1/012069).

6. Villafañe, I., Keogh, C., Curran, T. & Reynaud, E. (2018). Assessment of the Mechanical Properties of Pet Polymer Material from Recovered Plastic Bottles. *Present Environment and Sustainable Development*, 12, 203-214. DOI:10.2478/pesd-2018-0016.
7. Olam, M. (2023). Mechanical and Thermal Properties of HDPEPET Microplastics, *Applications, and Impact on Environment and Life*. DOI:10.5772/intechopen.110390.
8. Yakov, V., Okulicz-Kozaryn, W. & Myroshnichenko, O. (2023). Use of consumer polymer C-PET containers in food production technologies. *Technology audit and production reserves*, 1, 27-30. DOI:10.15587/2706-5448.2023.275074.
9. Voroshchuk, V.Ia., Vitenko, T.M. (2021). *Solidworks in tasks of 3D modeling and engineering of technical systems [Solidworks u zavdanniakh 3D modeliuвання ta inzhynirynhu tekhnichnykh system]*. FOP Palanytsia V.A.

Отримано 26.11.2024

UDC 678.7:539.3

**Bohdan Zavertannyi¹, Gennadiy Pasov², Myroslav Zaveretannyi³,
Volodymyr Venzheha⁴, Vira Murashkovska⁵**

¹ PhD, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: zavertannyi@stu.cn.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0009-0001-7492-3663>. **ResearcherID:** [KHD-2575-2024](https://orcid.org/0009-0001-7492-3663)

² PhD, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: genapasov@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>. **ResearcherID:** [H-4455-2014](https://orcid.org/0000-0001-7248-9085)

³ PhD, researcher of E.O. Paton Electric Welding Institute (Kyiv, Ukraine)

E-mail: zavertannyi@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8415-8555>

⁴ PhD, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vivenzhega@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8857-349X>. **ResearcherID** [H-3560-2014](https://orcid.org/0000-0002-8857-349X)

⁵ Senior Lecturer of the Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vmurashkovska@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0556-8709>. **ResearcherID** [G-9757-2016](https://orcid.org/0000-0002-0556-8709)

EXPERIMENTAL STUDY AND FINITE ELEMENT MODELING OF TENSILE DEFORMATION IN POLYMER SHELLS

Contemporary production of polymer shells for liquids involves advanced technological solutions, ensuring high quality and adequate mechanical properties for applications in the food and chemical industries. However, current trends aim to reduce shell weight while improving their mechanical characteristics through optimized geometric parameters. Consequently, there is a growing need for modelling new types of shells and their designs, taking into account material distribution during shell formation and its impact on mechanical properties.

When designing polyethylene terephthalate (PET) polymer shells, it is impractical to rely solely on previous development experience to create new product types. To verify product compliance with the required specifications, prototypes (physical samples of moleds) are manufactured, followed by the production of experimental shell samples and their subsequent testing, laboratory research, potential optimization of designs, and documentation changes, which is a time-consuming, costly, and lengthy process.

Experimental studies were conducted to obtain real-world characteristics of the distribution of polymeric material (polyethylene terephthalate) during the pneumatic forming of shells. This enables a departure from the idealized distribution of polymeric material during mathematical modelling of the stretching process and optimizes the design process of polymer shells. Finite element modelling of the stretching of polymer shells under internal pressure was performed, and the experimental results were compared with the simulation results.

This work presents an experimental study and mathematical modelling of the stretching process of polyethylene terephthalate polymer shells under internal pressure. The research was conducted at the research and production base of LLC "PET Technologies". The influence of the material distribution of polymer shells on resistance to internal pressure was investigated. The process of destruction of polymer shells under internal pressure was experimentally studied and demonstrated, and computer simulation of the process was carried out.

Keywords: polymer shell; polyethylene terephthalate; modelling; mechanical properties; tensile deformation.

Fig.: 6. **References:** 9.

**Євген Валентинович Корбут¹, Валерія Сергіївна Парненко²,
Тетяна Петрівна Ніколаєнко³, Олександр Васильович Даниленко⁴**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України

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

E-mail: korbut113@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1221-4052>. Scopus Author ID: [56736964700](https://orcid.org/0000-0002-1221-4052)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України

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

E-mail: v.parmenko@kpi.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1450-2744>. Scopus Author ID: [57217101654](https://orcid.org/0000-0002-1450-2744)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри нарисної геометрії та інженерної графіки

Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)

E-mail: tatyana.rodina@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0960-1251>

⁴кандидат 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>

АРХІТЕКТУРА ДИСКРЕТНОГО ПОКРИТТЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ РІЗНИХ СХЕМ РІЗАННЯ

Для вирішення питання ефективності використання інструмента з нанесеними на його робочі поверхні дискретних покриттів глобулярної структури необхідно розглянути фактори, що впливають на звантаженість різальних кромки. Звантаженість різальних кромки таких інструментів із нанесеним дискретним покриттям глобулярної структури залежить не лише від їхніх матеріалів та покриття, а й від схеми різання, яка відповідає мікрорізанню елементами покриття. У статті розглянуто вплив схеми різання на розташування цих ділянок. Розглянуто однолезовий інструмент дискретні ділянки покриття якого розташовані у шаховому порядку вздовж різального леза для отримання ефекту суцільного покриття. Також розглянуто багатолезовий інструмент де зміщення ділянок відбувається групами залежно від глибини різання. У роботі розраховано кількість глобул на кожній дискретній ділянці відрізної фрези, та силове навантаження інструменту, при якому в межах досліджуваних умов обробки не виникає руйнування покриття.

Ключові слова: процес різання; різальний інструмент; волокнистий полімерний композиційний матеріал; дискретне покриття глобулярного типу; схеми різання; дискові відрізи фрези.

Рис.: 4. Табл.: 7. Бібл.: 21.

Актуальність теми дослідження: Питання визначення працездатності інструменту шляхом створення захисних зміцнювальних покриттів на різальному інструменті є однією з задач підвищення ефективності їх використання. Основною вимогою до інструменту з покриття є запобігання руйнування покриття в процесі його експлуатації. На основі теоретичних досліджень когезійної, адгезійної та контактної міцності будь-якого покриття його руйнування залежить від фізико-механічних характеристик покриття підложки, на яке наноситься покриття [1; 2; 3; 4] та силового навантаження.

Звантаженість різальних кромки будь-якого інструмента залежать не тільки від його матеріалу з нанесеним покриттям і оброблюваної поверхні, але й від схеми різання, яка збігається зі схемою мікрорізання елементами покриття. За схемою мікрорізання визначається розташування глобул вздовж різальних кромки та розташування дискретних ділянок перпендикулярно різальній кромці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення зносостійкості робочих поверхонь РІ є основним резервом збільшення їхньої працездатності [5]. Зносостійкі покриття дозволяють підвищити довговічність РІ в декілька разів [6, 7, 8, 9]. Згідно з літературними джерелами [10; 11; 12; 13] сила різання при обробці ПКМ істотно впливає на якість обробки. Так, при збільшенні сили різання зростає температура в зоні різання, що призводить до деструкції матеріалу деталі. Також збільшення значення сили різання впливає на виникнення

магістральної тріщини в ПКМ, що впливає на експлуатаційні характеристики виробу – знижують цілісність композиту і як наслідок зменшують міцність деталі з ПКМ. Для вирішення доцільності використання інструменту з дискретно модифікованими робочими поверхнями необхідно дослідити вплив дискретизації робочої поверхні на силу різання. У статті розглядається покриття дискретного типу глобулярної структури [14; 15]. Дискретизація покриття призводить до зменшення величин залишкових напружень, що має підтвердження в роботах інших дослідників [16; 17; 18]. При цьому рівень залишкових напружень залежить від геометричних параметрів дискретних ділянок.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Визначення архітектури покриття на найбільш завантажених поверхнях інструменту гарантує визначення допустимих напружень на цих поверхнях, при яких у межах досліджуваних умов обробки не виникає руйнування покриття і які в процесі різання пов'язані з кінематичною схемою обробки.

Метою статті є визначення архітектури дискретних ділянок покриття глобулярної структури, нанесеного на робочі поверхні інструменту при різних схемах різання та силі завантаження різальних кромки інструменту при свердлінні та відрізанні.

Виклад основного матеріалу. Дискретні покриття глобулярної структури залежно від його товщини характеризується ділянками розмірами з кроком розташування та розміром ділянки на різальних елементах інструмента. У середині цих ділянок нанесене глобулярне покриття, глобули якого розташовуються паралельно сторонам ділянок. При такій конструкції покриття процес мікрорізання здійснюється кожною глобулою в межах дискретної ділянки, тобто групою глобул, утворюючи на поверхні інструмента рельєф подібний суцільному (рис. 1). У цьому випадку завантаження поверхні інструменту (з урахуванням процесу мікрорізання) залежно від розташування дискретних ділянок.

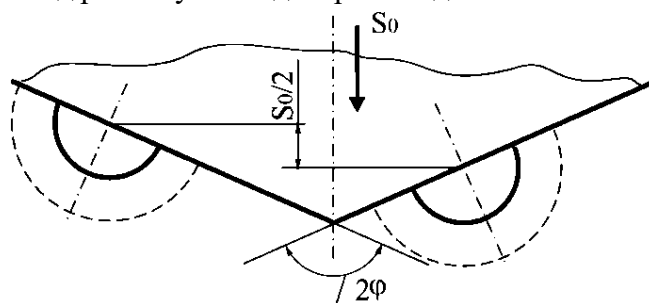


Рис. 1. Спрощена схема мікрорізання при свердлінні

Джерело: розроблено авторами.

Розглянемо розташування дискретних ділянок та утворення рельєфу глобулярного покриття на прикладі свердління ВПКМ.

Аналізуючи схему мікрорізання дискретним глобулярним покриттям при свердлінні можна зазначити, що в процесі обертання свердла глобули та дискретних ділянках, розташовані на двох різальних кромках за один оберт перекривають відстань між глобулами та дискретними ділянками [19]. Перекриття між глобулами відповідає кроку між глобулами та дискретними ділянками і дорівнює 0,5 діаметра глобули та розміру ділянки [20].

При свердлінні завдяки двом різальним лезам інструмента за один оберт свердла, кожна дискретна ділянка разом з глобулами під дією подачі зміщується як показано на рис. 1. Зміщуючись одна відносно другої утворюють на дискретній ділянці покриття подібне суцільному з певним рельєфом (рис. 2) [20].

Схема різання свердла характеризується кінематичною схемою, основою на сполученні двох рівномірних рухів – обертального і поступального. До цієї кінематичної схеми так само відноситься фрезерування і точіння. Проте слід відзначити, що точіння належить до однолезового інструменту в порівнянні зі свердлінням та фрезеруванням.

В основу розрахунку міцності глобули покладено розмір глобули, яка розглядається як полусфера, радіус якої відповідає товщині покриття.



Рис. 2. Рельєф глобулярного покриття [11]

Джерело: розроблено авторами.

Нормальні залишкові напруження в покритті можна визначити за формулою:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{(\alpha_n - \alpha_o) \Delta T}{\frac{1 - \nu_n}{E_n} + \frac{1 - \nu_o}{E_o} \cdot \frac{h_n}{2H_o}},$$

де α_n, α_o – середні лінійні коефіцієнти розширення матеріалів покриття і основи в інтервалі ΔT ; ΔT – різниця між температурою нанесення покриття і основою; ν_n, ν_o – коефіцієнти Пуассона матеріалів покриття і основи відповідно.

Максимальний допустимий розмір ділянки D , виходячи з умови недопущення вспучування при дії залишкових напружень стиску визначається за формулою:

$$D = l \leq \frac{\pi}{h_n} \sqrt{\frac{E_n}{3\sigma_{кр}^{зал}}}$$

де h_n – товщина покриття, l – лінійний розмір ділянки покриття, E_n – модуль пружності матеріалу покриття.

Для різних товщин міцність однієї глобули, при якій покриття не руйнується становить: $h = 3 \text{ мкм} = 0,0065 \text{ Па}$; $h = 5 \text{ мкм} = 0,009 \text{ Па}$; $h = 7 \text{ мкм} = 0,013 \text{ Па}$.

Покриття глобулярної структури розташоване на дискретних ділянках, розмір яких там уже залежить від товщини покриття, а дискретність становить також 50 % від розміру ділянки.

Розрахункові розміри дискретної ділянки та кількість глобул на ній наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Розрахункові розміри дискретної ділянки та кількість на ній глобул

№ п/п	Товщина покриття, мкм	Розмір дискретної ділянки, мм	Розмір ділянки з врахуванням дискретності, мм	Кількість глобул на ділянці
1	3	0,6x0,6	0,72x0,72	880
2	5	0,52x0,52	0,78x0,78	1225
3	7	0,48x0,48	0,9x0,9	2509

Джерело: розроблено авторами.

Знаючи міцність однієї глобули покриття, кількість глобул на одній дискретній мій ділянці та кількість дискретних ділянок свердла 8 вздовж різальних кромок можна визначити для різних товщин покриття силове навантаження одного ряду покриття вздовж різальних кромок свердла (табл. 2).

Таблиця 2 – Допустиме силове навантаження однієї ділянки покриття

№ з/п	Товщина покриття, мкм	Міцність глобули покриття, Па	Міцність ряду покриття, Па	Кількість дискретних ділянок вздовж різальної кромки	Силове навантаження одного ряду покриття вздовж різальної кромки
1	3	0,005	18,26	33	602,58
2	5	0,009	11,025	31	341,775
3	7	0,013	10,634	27	287,12

Джерело: розроблено авторами.

Наведені розрахунки за даними теоретичних досліджень показують що зі збільшенням товщини покриття силове навантаження на різальних кромках свердла зменшується.

Розглянемо навантаження різальних кромки свердла в процесі свердління за допомогою моделювання процесу різання.

Визначення значень осьової сили при свердлінні (табл. 3) проводилось за моделлю у вигляді функції $P_0 = f(h, n, S_0)$:

$$\ln P_0 = 7,87 + 1,17 \cdot 10^{-1} \cdot \ln S \cdot \ln n + 8,68 \cdot 10^{-3} \cdot h^2 + 8,63 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot h^3 + 1,2 \cdot 10^{-1} \cdot S \cdot \ln S \cdot \ln n \quad (\delta = 3,8\%).$$

Границі вибору зміни режимів різання обирались відповідно до рекомендацій довідника та даних нормативів швидкість різання V м/сек (X_2), подача S мм/об (X_3) і обмежень, пов'язаних із параметрами верстата глобулярного покриття h (мкм) та швидкістю V (м/сек).

Таблиця 3 – Осьова сила при свердлінні ВПКМ

№ досліду	h, мкм	n, об/хв	S, мм/об	P ₀ , Н
1	3	315	0,7	198,76
2	3	630	0,7	160,93
3	3	1250	0,5	121,49
4	7	630	0,3	197,81
5	3	1250	0,1	35,04
6	3	1000	0,7	216,55
7	7	315	0,1	39,62
8	7	315	0,7	91,07
9	7	1000	0,3	170,85
10	7	1250	0,5	91,74
11	7	1000	0,5	130,73
12	5	800	0,4	169,03
13	3	800	0,4	114,96
14	7	800	0,4	164,73
15	5	315	0,4	110,99
16	5	1250	0,4	106,62
17	5	800	0,1	48,67
18	5	800	0,7	129,53

Джерело: розроблено авторами.

У багатолезового інструмента зміщення дискретних ділянок відбувається їхніми групами, які залежать від глибини різання. При зміщенні груп ділянок спостерігається той самий ефект, що і при свердлінні, тобто суцільне покриття в межах групи.

Для однолезового інструменту, щоб одержати в межах однієї дискретної ділянки покриття глобулярної структури подібне суцільному, необхідно дискретні ділянки вздовж різального леза на передній і задній поверхнях розташовувати у шаховому порядку.

Розташування дискретних ділянок відносно леза залежить не тільки від кінематичної схеми, а й від кількості зубів 4 групі. Найменшій кількості зубів (один в групі) відповідає свердлінню.

Оскільки операція відрізання ВПКМ в авіаційній промисловості є поряд зі свердлінням найбільш вживаною, то вплив схем невірного різання на розташування дискретних ділянок розглянемо на прикладі процесу різання дисковою фрезою при розрізанні заготовок.

Процес розрізання дисковими фрезами належить до обробки багатолезовим інструментом, за схемою невірного різання (рис. 3) [21].

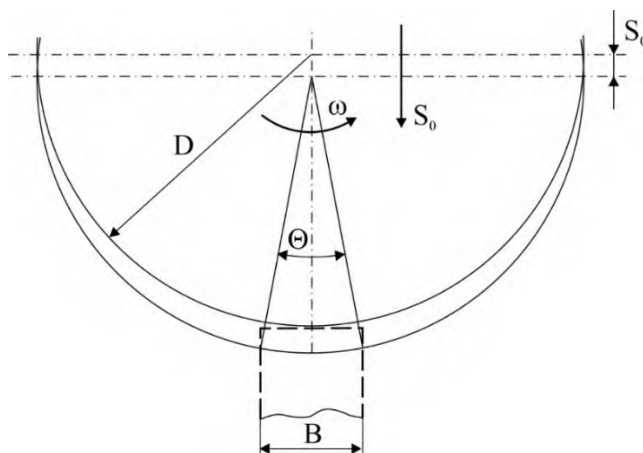


Рис. 3. Схема розрізання заготовки дисковими фрезами

Джерело: розроблено авторами.

Як зазначалось, розрізання цим інструментом здійснюється в умовах невірного різання, яке насамперед сприймається торцями фрез. Тому для розрахунку силового навантаження необхідно знати параметри, якими вони визначаються як на групі головних лез, так і на торцях.

Для заданої схеми розрізання заготовок ВПКМ визначимо кількість дискретних ділянок глобулярного покриття вздовж (головного та допоміжного) леза окремого зуба та групи зубів у межах кута θ . Кількість ділянок вздовж леза зуба залежить від товщини дискової фрези, тобто від довжини леза та розмірів дискретних ділянок, які визначені теоретичними дослідженнями для кожної товщини покриття.

У цих дослідженнях розглянуто покриття завтовшки 3, 5 та 7 мкм і фрези з довжиною леза 2, 3 і 4 (мм). Розмір дискретної ділянки з глобулярним покриттям для заданих (товщини) становить: $h = 3$ мкм - 0,6 мм; $h = 5$ мкм - 0,78 мм; $h = 7$ мкм - 0,9 мм.

Кут θ визначається зі співвідношення

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{B_3}{2R},$$

де B_3 – товщина заготовки, мм;

R – радіус фрези, мм.

У дослідженнях при визначенні кута θ товщина заготовок, які відрізаються (B_3), була прийнятною 20 мм. Для різних діаметрів фрез кут θ за розрахунками становить: $D = 120$ мм – $\theta = 9^\circ 30'$; $D = 160$ мм – $\theta = 7^\circ 25'$; $D = 200$ мм – $\theta = 6^\circ$.

За значеннями кута θ визначається кількість зубів у групі.

Оскільки процес відрізання належить до невірного різання, то силове навантаження зубів фрез розраховується для сталі, а саме, різальної частини зубів та їхніх торців.

Для визначення силового навантаження в групі зубів на різальній частині інструменту необхідно визначити кількість одного ряду ділянок вздовж одного леза та кількість їх у групі зубів.

Оскільки на дисковій фрези дискретне покриття глобулярної структури нанесення на всю робочу поверхню цього інструменту, то для визначення силового навантаження на різальній частині необхідно знати кількість дискретних ділянок, розташованих на ній. Це стосується рівною мірою і різальної частини досліджуваних фрез і їхніх торців.

Зміну кількості дискретних ділянок вздовж леза фрези в межах групи зубів (кута θ) для різних діаметрів фрез, кількості їхніх зубів та товщини покриття розглянуто на прикладі одного ряду ділянок (рис. 4).

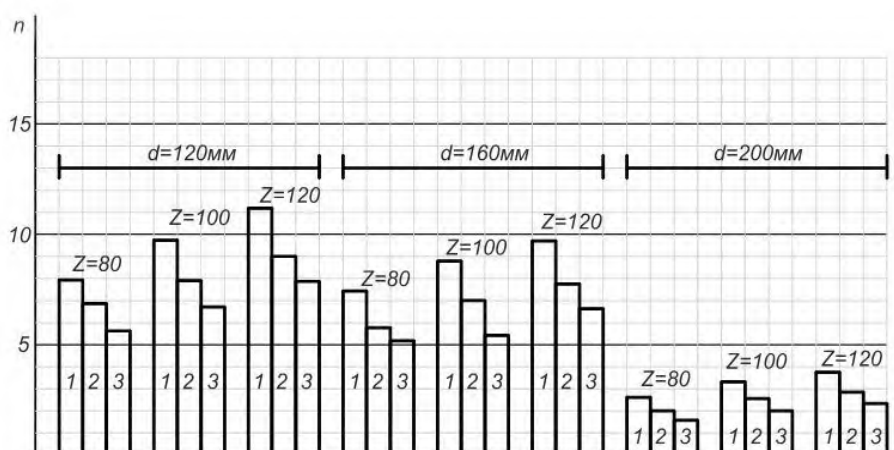


Рис. 4. Кількість дискретних ділянок (n) у групі зубів на різальній частині вздовж лез:

$$1 - h = 3 \text{ мкм}; 2 - h = 5 \text{ мкм}; 3 - h = 7 \text{ мкм}$$

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз зміни кількості дискретних ділянок для фрез з довжиною леза 2 мм показує, що кількість одного ряду ділянок зменшується зі збільшенням діаметра фрези, тобто зі зменшенням кута θ . Збільшення товщини покриття при одних і тих же значеннях діаметрів фрез також викликає зменшення кількості дискретних ділянок, що пов'язане зі збільшенням їхніх розмірів. Збільшення кількості зубів фрези тих самих діаметрів фрези й товщині покриття призводить до збільшення кількості ділянок вздовж леза, що пояснюється кількістю зубів у групі.

Кількість рядів дискретних ділянок глобулярного покриття групи зубів залежать від товщини покриття та режимів різання. Вважаємо відрізання здійснюється при тих же самих подачах та швидкості, що і свердління.

Визначення силового навантаження на різальній частині інструмента напружень при відрізанні потребує розрахунку кількості глобул на кожній дискретній ділянці.

За кількістю дискретних ділянок одного ряду групи зубів, кількістю глобул на одній дискретній ділянці та кількістю рядів на різальній частині фрези визначається кількість глобул на кожному зубі пили.

Кількість рядів дискретних ділянок із глобулярним покриттям групи зубів залежать від товщини покриття, розмірів відрізних фрез, кількості їхніх зубів та розмірів їхніх стружкових канавок.

Профілі стружкових канавок та їхні розміри досліджуваних фрез згідно з ГОСТ 36799-93.

Вважаємо, що кількість рядів покриття групи зубів на передній поверхні визначається прямолінійністю поверхні зуба стружкової канавки фрези.

Кількість рядів покриття на задній поверхні зуба фрези визначається з умови максимального допустимого завантаження різальної кромки зуба і приймається рівним двом рядам.

Результати наближеного розрахунку параметрів для силового навантаження розрізання ВПКМ на різальній частині наведені в табл. 4.

Згідно зі схемою відрізання заготовки із ВПКМ на торцях дискових фрез також виникають напруження, що можуть призвести до руйнування покриття. Тому виникає задача встановлення параметрів фрез для розрахунку допустимих напружень на торцях фрез.

Таблиця 4 – Силове навантаження різальної частини фрез

№ n/n	Товщина покриття, мкм	Z	Кількість зубів у групі	Кількість дискретних ділянок на зубі	Кількість дискретних ділянок у групі	Кількість глобул		Міцність глобули, Па	Силове навантаження $P_0, Н$
						на одній ділянці	на ділянках групи зубів		
Діаметр фрези $\varnothing 120$ мм									
1	3	80	2,01	6	12	1973,3	23680	0,0065	159,92
2		100	2,56	3	7,68		15105		98,2
3		120	3,02	2,6	7,8		15342		99,7
4	5	80	2,61	6	12	1156	13372	0,009	120,3
5		100	2,56	3	7,68		8878		79,9
6		120	3,02	2,6	7,8		9016,8		81,15
7	7	80	2,01	6	12	816	9792	0,013	127,3
8		100	3,56	3	7,68		6266		81,46
9		120	3,02	2,6	7,8		6365		82,75
Діаметр фрези $\varnothing 160$ мм									
10	3	80	1,87	4	7,98	1973,3	15747	0,0065	102,35
11		100	2,34	3	7,02		13859		90,08
12		120	2,5	2,69	6,7		13221		85,44
13	5	80	1,87	4	7,98	1156	9223	0,009	83,007
14		100	2,34	3	7,02		8115		73,095
15		120	2,5	2,69	6,7				69,7
16	7	80	1,87	4	7,98	816	6511	0,013	84,6
17		100	2,34	3	7,02		5728		74,6
18		120	2,5	2,69	6,7		5467		71,07
Діаметр фрези $\varnothing 200$ мм									
19	3	80	0,77	4,3	3,3	1973,3	28001	0,0065	182,0
20		100	0,95	3,3	3		19535,7		126,98
21		120	1,5	2,9	4,3		24607		159,93
22	5	80	0,77	4,3	3,3	1156	16404	0,009	147,633
23		100	0,95	3,3	3		11444		103
24		120	1,5	2,9	4,3				129,7
25	7	80	0,77	4,3	3,3	816	11579	0,013	150,52
26		100	0,95	3,3	3		8078		80,78
27		120	1,5	2,9	4,3		10175,5		132,28

Джерело: розроблено авторами.

Відрізнi фрези за своєю конструкцією характеризується двома різними частинами, а саме переривчастою і суцільною. На переривчастій частині нарізані стружкової канавки. У цьому разі площа на торцях зубів визначається як різниця суцільного кільця без стружкових канавок. Суцільне покриття на торцях фрези нанесення до ступиці фрези. Тому силоне навантаження на торцях досліджуваних фрез вирішується у два етапи.

При розрізанні ВПКМ дисковими фрезами з покриттям глобулярної структури на їхніх зубцях виникають певні навантаження. Розрахунок цих навантажень дещо відрізняється від їх розрахунку на різальній частині свердел.

У роботі розглянуто дискові фрези з мілким зубом, основні розміри яких наведені в табл. 5.

Як відзначалось, відрізання дисковими фрезами здійснюється в умовах невеликого різання, що насамперед сприймається торцями фрез. Для зменшення цього негативного явища торці фрез, виконують з піднутренням, тобто з кутом φ .

Таблиця 5 – Основні розміри та вихідні дані для розрахунку силового навантаження

D, мм	Z	B, мм	Крок, мм	ϕ'	d, мм	d ₁ , мм
120	80	2	4,71	30	22	34
	100		3,71			
	120		3,14			
160	80		6,28		32	47
	100		5,02			
	120		4,19			
200	80		7,8		32	67
	100		6,25			
	120		5,2			

Джерело: розроблено авторами.

Площа покриття нанесеного на торці фрез визначається різницею діаметрів фрези D та ступиці d₁ (D-d₁) (табл. 5), що викликано особливостями подальшої експлуатації фрез і значно спрощує процес їх відновлення після затуплення.

Для розрахунку силового навантаження на торцях дискових фрез обґрунтувати розташування глобул на торцях та визначити параметри процесу відрізання. Для цього передусім необхідно знати площу покриття, нанесеного на торці.

Для визначення площі покриття знайдемо площу кільця, на якому нарізані зубці фрези та прощу диска після внутрішнього діаметра кільця. Зовнішній діаметр цього кільця відповідає діаметру фрези, внутрішній – це зовнішній мінус глибина стружкової канавки.

Площа вибраної кількості рядів дискретних ділянок після внутрішнього діаметра кільця залежить від товщини покриття.

Таким чином площа торця кожної із фрез на кільці розраховується як різниця площі диска, обмеженого діаметром фрези (D), та диска, обмеженого глибиною стружкових канавок (внутрішній диск D_{вн}) за вирахуванням стружкових канавок – (D - D₀). Результати наближеного розрахунку площі покриття фрез на торцях зубів наведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Результати наближеного розрахунку площі покриття фрез на торцях зубів

№ з/п	Z	Кількість зубів у групі	Площа стружкової канавки	Площа стружкових канавок у групі, мм ²	Площа одного зуба на торці, мм ²	Площа на торцях зубів у групі, мм ²
Діаметр фрези – D = 120 мм						
1	80	2,01	7,08	14,16	6,7	12,8
2	100	2,56	4,7	12,2	4,56	11,67
3	120	3,02	3,584	10,75	2,79	8,37
Діаметр фрези – D = 160 мм						
4	80	1,87	14,2	26,5	15,4	28,8
5	100	2,34	9,49	22,2	7,71	18,04
6	120	2,5	6,57	11,425	4,66	11,65
Діаметр фрези – D = 200 мм						
7	80	0,77	16,75	12,89	8,07	6,214
8	100	0,95	10,36	9,812	9,85	9,36
9	120	1,5	6,54	9,81	7,58	11,37

Джерело: розроблено авторами.

Для різних діаметрів фрез і кількості зубів в межах кута Θ розраховується площа на торцях фрези.

По напруженню (щільності), яка за розрахунками теоретичних досліджень витримує одна глобула й кількістю глобул, які контактують з поверхнею заготовки, яку відрізають, визначається максимально можливе силове навантаження на торцях фрези.

Розрахункове значення силового навантаження на торцях залежно від товщини покриття наведено в табл. 7.

Таблиця 7 – Силowe навантаження на торцях фрез

№ з/п	D, мм	Z	Площа покриття зубів на торцях, мм ²	Площа покриття дисків торця фрез, мм ²	Загальна площа покриття на торцях, мм ²	Загальна кількість дискретних ділянок	Загальна кількість глобул	Міцність глобули, Па	Силowe навантаження P ₀ , Н
Товщина покриття $h = 3$ мкм									
1	120	80	27,6	1,414	29,04	86	169707	0,00015	25,45
2		100	22,34	1,16	23,5	70	198110		20,7
3		120	16,74	2,106	18,9	56	110488		16,6
4	160	80	57,6	1,292	58,992	175	345275		51,8
5		100	36,08	1,714	37,794	112	222949		33,4
6		120	23,3	1,72	25,02	74	146002		21,9
7	200	80	12,428	0,59	13,28	39,5	779335		11,69
8		100	18,72	0,724	19,444	58	112114		16,8
9		120	22,74	1,14	24,88	79,8	197080		29,56
Товщина покриття $h = 5$ мкм									
10	120	80	27,6	1,352	28,952	51,5	61887,5	0,00026	16,09
11		100	22,34	1,102	23,442	41,7	50100,9		13,03
12		120	16,74	1,988	18,62	33	39650		10,31
13	160	80	57,6	1,272	58,872	104	124976,8		32,49
14		100	36,08	1,609	37,7	67	80514		20,9
15		120	23,3	1,69	24,99	44	52874,8		13,7
16	200	80	12,428	0,57	12,998	23	27662,1		7,19
17		100	18,72	0,704	19,424	34,5	41098,14		10,685
18		120	22,7	0,954	23,654	42	50471,4		13,12
Товщина покриття $h = 7$ мкм									
19	120	80	27,6	1,272	28,872	38,3	31262	0,00045	14,068
20		100	22,34	1,62	23,96	31,8	25956,6		11,68
21		120	16,74	1,908	18,648	25,8	21059		9,47
22	160	80	57,6	1,67	59,27	78,7	64238,5		28,9
23		100	36,08	2,086	39,166	53,7	43832,3		19,7
24		120	23,3	2,2	25,5	33,8	27589		12,41
25	200	80	12,428	0,604	13,032	17,3	14121		6,35
26		100	18,72	0,742	19,462	25,85	21100		9,5
27		120	22,7	1,176	23,876	31,7	25875		11,64

Джерело: розроблено авторами.

Загальна площа торця дискової пили складається із площі покриття торців зубів фрез (табл. 7) та диска. Для кожного типу розміру фрези вона визначається кутом θ . Кількість ділянок на торцях вона розраховується для дослідження фрез на основі теоретичного визначення ділянки та їх відстані одна від одної, які розраховані (відстань між ними дорівнює 45 % від розміру ділянки) залежно від товщини покриття.

Покриття глобулярної структури на дискретній ділянці має щільність 50 %. З урахуванням щільності покриття розраховується кількість глобул на ділянці, а за кількістю ділянок зубів у групі, обмеженою кутом θ визначається загальна кількість глобул при розрізанні напруження.

Напруження, яке витримує одна глобула, розраховано на основі теоретичних даних при дослідженні процесу свердління, то воно (незалежно від виду різання) буде таким же самим при розрізанні.

За результатами розгляду особливостей мікрорізання при свердлінні та відрізання, показано що архітектура покриття залежить не тільки від його залишкових напружень у результаті яких може виникати когезійне, адгезійне та контактне руйнування покриття, але й від розташування дискретних ділянок щодо різальної кромки.

На основі проведених розрахунків встановлено вплив міцності покриття на силове навантаження інструменту з дискретним покриттям глобулярної структури.

Це зумовлено конструкцією нанесеного покриття яке зумовлює особливості процесу різання.

Висновки. Аналізуючи вплив досліджуваних чинників на силове навантаження (табл. 3) при свердлінні за даними моделювання та їх перевіркою експериментом, встановлено, що найбільший вплив на значення осьової сили (P_0 , H) має подача.

Порівнюючи значення сил різання при свердлінні з розрахованими при розрізанні, слід зауважити, що силове навантаження на групу зубів при розрізанні значно менше й залежить від товщини покриття та конструктивних параметрів фрез (табл. 7). Це пояснюється тим, що відрізання здійснюються групою дискретних ділянок, яка залежить від кута Θ (рис. 3).

Таким чином, із наведеного аналізу різних схем різання дискретне покриття глобулярної структури з позицій за критерієм допустимого силового навантаження повністю забезпечує розрахункову міцність покриття, що забезпечується його конструкцією і повністю може замінити твердосплавний інструмент з алмазним суцільним покриттям. Можливість такої заміни визначається обладнанням, на якому здійснюється обробка ВПКМ таким інструментом.

На основі дослідження напружено-деформованого стану дискретних покриттів глобулярної структури розроблено архітектуру модифікованого поверхневого шару різального інструменту для обробки ВПКМ. Отримані результати дозволяють формувати дискретні ділянки покриття за умовами стійкості.

Список використаних джерел

1. Терещенко, Ю. М. Авіаційні матеріали та їх обробка / Ю. М. Терещенко, К. О. Животовська, М. О. Животовський, О. В. Мамлюк, І. Г. Носовський. – Київ : Вища освіта, 2003. – 303 с.
2. Erian, A. Armanios. Composite materials. Fatigue and fracture / Erian, A. Armanios. – ASTM, 1997. – 573 с.
3. Кіндрачук, М. В. Визначення параметрів дискретної структури покриттів / М. В. Кіндрачук, М. С. Яхья, А. О. Корнієнко [та ін.] // Проблеми тертя та зношування. – 2008. – Вип. 50. – С. 5-15.
4. Ляшенко, Б. А. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений / Б. А. Ляшенко, Е. Б. Сорока, А. В. Рутковский // Проблемы прочности. – 2002. – № 4. – С. 119-125.
5. Deborah D. L. Chung. Composite materials: science and applications. Functional materials for modern technologies/ Deborah D. L. Chung. – Printed in Great Britain, 2004. – 293p.
6. Ляшенко, Б. А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение в Украине / Б. А. Ляшенко, С. А. Клименко // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 94-104.
7. Гавриш, А. П. Зміцнення металевих поверхонь деталей та механізмів / А. П. Гавриш, П. О. Киричок, М. П. Підберезний. – Київ: Наукова думка, 1995. – 173 с.
8. Ляшенко, Б. А. Технологические, конструктивные и эксплуатационные особенности упрочняющих покрытий дискретной структуры на деталях машин и инструменте / Б. А. Ляшенко, Е. К. Соловых, Е. Б. Сорока [и др.] // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління: тези доп. 3-ої наук.-практ. конф. – Київ : КУЕТТ, 2005. – С. 22-23.
9. Клименко, С. А. Оптимизация дискретной структуры при поверхностной электроконтактной закалке / С. А. Клименко, Е. К. Солових, Е. Б. Сорока [и др.] // Инженерия поверхности и реновация изделий : материалы 6-й междунар. н.-техн. конф. – Киев : АТМ України, 2006. – С. 83-85.
10. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор) : монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залого, В. А. Колесник и др. ; под общей ред. проф. В. А. Залого. – Сумы : Университетская книга, 2013. – 272 с.
11. Тарасюк, А. П. Технологии механической обработки полимерных композитов : монография / А. П. Тарасюк, О. Л. Кондратюк, Н. В. Верезуб. – Харьков : Точка, 2015. – 226 с.

12. Самчук, В. В. Підвищення ефективності механічної обробки виробів з полімерних композиційних матеріалів / В. В. Самчук // *Машинобудування. Верстати та інструменти.* – 2014. – № 13. – С. 107-115.
13. Везуб, Н. В. Энергетические аспекты разрушения полимерных композитов при резании / Н. В. Везуб, Г. Л. Хавин, А. П. Тарасюк // *Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб.* – Харьков : НТУ «ХПИ», 2001. – Вып.59. – С. 28-34.
14. Антонюк, В. С. Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу: дис... д-ра техн. наук / В. С. Антонюк; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – Київ, 2006. – 375 с.
15. Електроіскрові покриття для зміцнення різального інструменту / В. І. Калініченко, В. С. Марчук, М. І. Денисенко, В. Ф. Лабунець, В. В. Загребельний // *Проблеми тертя та зношування.* – 2016. – № 3. – С. 40-45.
16. Klocke, F. Coated Tools for Metal Cutting – Features and Applications / F. Klocke, T. Krig // *CIRP Annals-Manufacturing Technology.* – 1999. – Vol. 48, № 2. – Pp. 515-525.
17. Солових, Є. К. Науково-методологічні основи підвищення несучої здатності функціональних покриттів конструктивними і технологічними методами : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.07 / Солових Євген Костянтинович ; Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». – Київ, 2013. – 36 с.
18. Визначення параметрів дискретної структури покриттів / М. В. Кіндрачук, М. С. Яхья, А. О. Корнієнко [та ін.] // *Проблеми тертя та зношування.* – 2008. – Вип. 50. – С. 5-15.
19. Сорока, О. Б. Методологія оптимізації зносостійких покриттів за критеріями міцності і роботоздатності : дис. ... д-ра техн. наук : 01.02.04 / О. Б. Сорока ; Ін-т пробл. міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України. – Київ, 2011. – 345 с.
20. Корбут, Є. Вплив товщини дискретного глобулярного покриття, нанесеного на різальний інструмент та режимів свердління на шорсткість поверхні деталей зі склопластика. / Є. Корбут, В. Парненко, Т. Ніколаєнко // *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.* – 2022. – Вип. 1(132). – С. 180-185. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.1.24>.
21. Botvinovska, S. General procedure for determining the geometric parameters of tools in the technological systems involving machining by cutting // S. Botvinovska, G. Getun, A. Zolotova, I. Korbut, T. Nikolaenko, V. Parnenko, R. Rodin // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2021. – Vol. 1/1 (109). – P. 6 - 12. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.224897.

References

1. Tereshchenko, Yu.M., Zhyvotovska, K.O., Zhyvotovskiyi, M.O., Mamliuk, O.V., Nosovskyi, I.H. (2003). *Aviatsiini materialy ta yikh obrobk [Aviation materials and their processing]*. Vyshcha osvita.
2. Armanios, E.A. (1997). *Composite materials. Fatigue and fractureie*. MI.
3. Kindrachuk, M.V., Iakhia, M.S., Korniienko, A.O., et al. (2008). Vyznachennia parametriv dyskretnoi struktury pokryttiv [Determination of parameters of the discrete structure of coatings]. *Probl. tertia ta znoshuvannia – Problem friction and wear*, 50, 5–15.
4. Liashenko, B.A., Soroka, E.B., Rutkovskiyi, A.V. (2002). Opredelenye parametrov dyskretnoi struktury pokrytyi s uchetom ostatochnykh napriazheniy [Determination of parameters of discrete structure of coatings taking into account residual stresses]. *Problemy prochnosti – Problems of strength*, 4, 119–125.
5. Chang, D.D.L. (2004). *Composite materials: science and applications. Functional materials for modern technologies*. Printed in Great Britain.
6. Liashenko, B.A., Klymenko, S.A. (1999). Tendentsyy razvytyia uprochniaiushchei poverkhnostnoi obrabotky u polozhenye v Ukrayne [Trends in the development of hardening surface treatment and the situation in Ukraine]. *Suchasne mashynobuduvannia – Modern machine building*, 1, 94–104.
7. Havrysh, A.P., Kyrychok, P.O., Pidbereznyi, M.P. (1995). *Zmitsnennia metalevykh poverkhon detalei ta mekhanizmiv [Strengthening of metal surfaces of parts and mechanisms]*. Naukova dumka.
8. Liashenko, B.A., Solovykh, E.K., Soroka, E.B., et al. (2005). Tekhnolohycheskye, konstruktyvnye y ekspluatatsyonnye osobennosti uprochniaiushchykh pokrytyi dyskretnoi struktury na detaliakh mashyn iynstrumente [Technological, constructive and operational features of reinforcing coated discrete structures on machine parts and instruments]. *Problemy ta perspektyvy rozvytku transportnykh*

system: *tekhnika, tekhnolohiia, ekonomika i upravlinnia – Problems and prospects of development of transport systems: technique, technology, economy and management* : Proceedings of the third scientific and practical conference Series "Engineering, Technology" (pp. 22–23).

9. Klymenko, S.A., Solovykh, E.K., Soroka, E.B., et al. (2006). Optimization of discrete structure during surface electrocontact hardening [Optimization of discrete structure during surface electrocontact hardening]. *Inzheneryia poverkhnosti i renovatsiia izdel'nykh – Surface engineering and renovation of products* : Proceedings of the 6th scientific and technical conference (pp. 83–85). Kyiv-Yalta.

10. Kryvoruchko, D.V., Zaloha, V.A., Kolesnyk, V.A. et al. (2013). *Mekhanicheskaia obrabotka kompozytsionnykh materialov pry sborke letatelnykh apparatov (analytycheskyi obzor) [Mechanical processing of composite materials during aircraft assembly (analytical review)]*. University book.

11. Tarasiuk, A.P., Kondratiuk, O.L., Verezub, N.V. (2015). *Tekhnolohiia Mekhanicheskoi obrabotky polimernykh materialov [Technology of Mechanical Processing of Polymer Materials]*. Kharkov.

12. Samchuk, V.V. (2014). Pidvyshchennia efektyvnosti mekhanichnoi obrabotky vyrobiv z polimernykh kompozytsiinykh materialiv [Increasing the efficiency of mechanical processing of products from polymer composite materials]. *Mashynobuduvannia. Verstaty ta instrumenty – Mechanical engineering. Machines and tools*, 13, 107–115.

13. Verezub, N.V., Khavin, H.L., Tarasiuk, A.P. (2001). Enerhetycheskye aspekty razrusheniia polimernykh kompozytov pry rezannyi [Energy aspects of destruction of polymer composites during cutting]. *Rezanye i ynstrument v tekhnolohycheskykh systemakh – Cutting and tools in technological systems*, 59, 28–34.

14. Antoniuk, V.S. (2006). *Osnovy pidvyshchennia pratsezdatsnosti rizalnoho instrumentu shliakhom formuvannia znosostiikykh pokryttiv dyskretnoho typu [Basics of increasing the efficiency of cutting tools by forming wear-resistant coatings of a discrete type]*. Doctor's thesis.

15. Elektroiskrove pokryttia dlia zmitsnennia rizalnoho instrument [Electrospark coating for strengthening the cutting tool]. (2016). *Problemy tertia ta znoshuvannia – Friction and wear problems*, 72, 40–45.

16. Klocke, F., Krig, T. (1999). Coated Tools for Metal Cutting – Features and Applications. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2, 515–525.

17. Solovykh, Ye.K. (2013). Naukovo-metodolohichni osnovy pidvyshchennia nesuchoi zdatsnosti funktsionalnykh pokryttiv konstruktyvnymy i tekhnolohichnymy metodamy [Scientific and methodological bases of increasing the bearing capacity of functional coatings by constructive and technological methods]. Doctor's thesis.

18. Kindrachuk, M.V., Iakhia, M.S., Korniienko, A.O., et al. (2008). Vyznachennia parametriv dyskretnoi struktury pokryttiv [Determining the parameters of the discrete structure of coatings]. *Problemy tertia ta znoshuvannia – Friction and wear problems*, 50, 5–15.

19. Soroka, O.B. (2011). *Metodolohiia optymizatsii znosostiikykh pokryttiv za kryteriiamy mitsnosti i robotozdatnosti [Methodology of optimization of wear-resistant coatings according to the criteria of strength and workability]*. Doctor's thesis.

20. Korbut, Ye., Parnenko, V., Nikolaienko, T. (2022). Vplyv tovshchyny dyskretnoho hlobuliarnoho pokryttia, nanosenoho na rizalnyi instrument ta rezhymiv sverdlinnia na shorstkist poverkhni detalei zi skloplastyka [The influence of the thickness of the discrete globular coating applied to the cutting tool and the drilling modes on the surface roughness of fiberglass parts]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 1(132), 180–185.

21. Botvinovska, S., Getun, G., Zolotova, A., Korbut, I., Nikolaenko, T., Parnenko, V., Rodin, R. (2021). General procedure for determining the geometric parameters of tools in the technological systems involving machining by cutting. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/1(109), 6–12.

Отримано 19.12.2024

Korbut Ievgen¹, Valeriia Parnenko², Tetiana Nikolaienko³, Oleksandr Danylenko⁴

¹PhD, assistant professor, department of machine design National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: korbut113@gmail.com, **ORCID:** 0000-0002-1221-4052, Scopus Author ID: 56736964700

²PhD, assistant professor, department of machine design National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.parnenko@kpi.ua, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1450-2744>.

https://www.researchgate.net/profile/Valeriya_Parnenko, Scopus Author ID: 57217101654

³assistant professor, department of descriptive geometry and engineering graphics, Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

E-mail: tatyana.rodina@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0960-1251>.

ResearcherID: https://www.researchgate.net/profile/Tatyana_Nikolayenko.

⁴PhD, assistant professor, department of machine design 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>

**THE LOCATION OF DISCRETE AREAS OF COAT
WITH GLOBULAR STRUCTURE ON THE TOOL SURFACES
WITH DIFFERENT CUTTING SCHEMES**

The development of the aerospace and automotive industries is linked to the use of fibre polymer composites. In order to increase the wear resistance of tools for machining these materials, discrete coatings of a globular structure are used on the working surfaces of the tools. The loading of the cutting edges of such tools with a discrete coating of globular structure depends not only on their materials and coating, but also on the cutting pattern, which corresponds to microcutting by coating elements. According to this scheme, the position of globules along the edges and discrete areas perpendicular to them are determined. This paper investigates the influence of the cutting pattern on the location of these areas. We have considered a single blade tool where the discrete areas of coating are arranged in a checkerboard pattern along the cutting blade to give the effect of a continuous coating. Also under consideration is a multi-blade tool where the displacement of the areas is in groups as a function of the depth of cut. It is shown that when changing the number of discrete sections for milling cutters with a blade length of 2 mm, the number of sections in a row decreases as the diameter of the cutter increases, i.e. as the angle θ decreases. Increasing the coating thickness for the same values of cutter diameters also causes a decrease in the number of discrete areas, which is associated with an increase in their size. An increase in the number of cutter teeth for the same diameter and coating thickness leads to an increase in the number of areas along the blade, which is explained by the number of teeth in the group. Since the disc cutters considered in the paper have a discrete coating of globular structure applied to the entire working surface of this tool, in order to determine the force load on the cutting part, it is necessary to know the number of discrete areas located both on the cutting part of the cutters studied and on their ends. The paper calculates the number of globules on each discrete section of the cutter, which enables the calculation of the tool load at which the coating does not break under the processing conditions studied.

Key words: cutting tool, fibrous polymer composite material, discrete coating of globular type, cutting schemes, disc cutters, saw.

Fig.: 4. Table: 7. References: 21.

**Сергій Владиславович Олексієнко¹, Михайло Миколайович Руденко²,
Світлана Михайлівна Ющенко³, Максим Геннадійович Болотов⁴,
Микола Миколайович Корзаченко⁵**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: sv.oleks@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>
ResearcherID: F-8197-2014. SCOPUS Author ID: 57190370561

²старший викладач кафедри технологій зварювання та будівництва,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: m.rudenko@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>
ResearcherID: G-6235-2014. SCOPUS Author ID: 57190378153

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: rasssveta@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0863-9020>
ResearcherID: F-7741-2014. SCOPUS Author ID: 57190373626

⁴кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: m.bolotov@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>
ResearcherID: AAJ-6633-2020. SCOPUS Author ID: 57190377278

⁵кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: korzachenko_87@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5674-8662>
ResearcherID: F-5177-2016. SCOPUS Author ID: 57330883100

САЕ-АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗВАРНОЇ ДВОТАВРОВОЇ КОЛОНИ З РЕГУЛЬОВАНИМ ПОЛЕМ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЇЇ ПЕРЕРІЗІ

Розрахунок на міцність та стійкість суцільних зварних двотаврових колон за чинними нормами проектування виконується з врахуванням наявності залишкових напружень від зварювання у їх перерізі. Вплив залишкових зварювальних напружень стиску на кромках полиць проявляється у втраті їх місцевої стійкості. Проведено комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану, що виникає при експлуатації зварних колон. Розглянуто способи зниження величини зварювальних напружень стиску на кромках полиць, визначено їх ефективність стосовно підвищення загальної стійкості колон та зниження їх матеріалоемності.

Ключові слова: зварна колона; суцільний переріз; стійкість; залишкові напруження; матеріалоемність.

Рис.: 9. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Основу каркасів промислових будівель складають плоскі поперечні рами, які утворюються з колон та ригелів, що на них спираються. На вибір конструктивних рішень при проектуванні колон та ригелів мають вплив безліч факторів: призначення будівлі, тип покриття, наявність кранів та їхня вантажопідйомність, габаритні розміри, крок колон тощо.

Колони є вертикальними елементами, які підтримують розташовані на них конструкції, сприймають навантаження і передають їх на фундаменти. Використовується два типи перерізів колон: суцільні та наскрізні. В порівнянні з колонами суцільного перерізу, наскрізні більш ефективні за матеріалоемністю та за можливістю забезпечення рівності стійкості у двох площинах, однак при виготовленні вони більш трудомісткі. При значних навантаженнях і відносно невеликих довжинах використовуються суцільні колони, а наскрізні – при великій довжині та менших навантаженнях [1].

Використання суцільних колон двотаврового перерізу, які відносяться до групи відкритих перерізів, дозволяє спростити вузли обпирання на них інших елементів. На відміну від прокатних двотаврів типу К, використання зварних двотаврових колон із трьох листів дозволяє забезпечити отримання більш економічного з точки зору витрат сталі перерізу. При цьому авторами роботи [1] зазначається, що більш раціональною з погляду мінімальної матеріалоемності буде колона, у якої площа поперечного перерізу буде мати мінімальне значення при якомога більшому значенні коефіцієнта стійкості (коефіцієнта

повздожнього згину) φ . У свою чергу коефіцієнт стійкості збільшується зі зростанням моменту інерції перерізу I , що вимагає зосереджувати основну масу матеріалу якнайдалі від центра ваги. Таким чином, переріз komponують із елементів мінімальної товщини і обов'язково стає необхідність забезпечення їх місцевої стійкості.

Постановка проблеми. При проектуванні колон суцільного перерізу за чинними нормами проектування [1-3] враховується наявність у них власних напружень від прокатування чи зварювання (рис. 1). Це зумовлено тим, що власні напруження в поєднанні з напруженнями від експлуатаційного навантаження впливають на несучу здатність елемента. У такому разі при розрахунку на стійкість зварних елементів суцільного перерізу використовуються занижені значення коефіцієнтів φ і до уваги береться залежність коефіцієнта повздожнього згину від умовної гнучкості стержнів для різних форм поперечних перерізів.

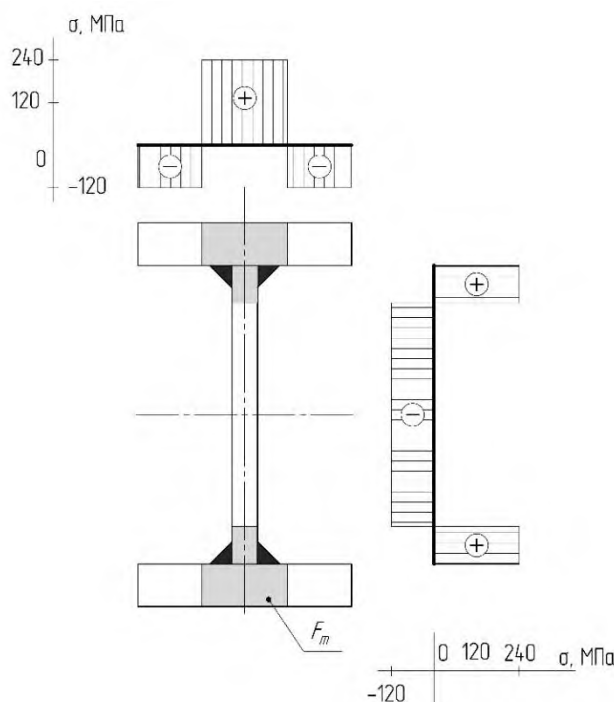


Рис. 1. Розподіл залишкових напружень у перерізі колони після зварювання

Як вказується у роботі [4], викликані зварюванням залишкові напруження стиску у перерізі елементів знижують стійкість та несучу здатність стиснутих зварних двотаврових колон Н-подібного перерізу, якщо залишкові напруження на кромках поясів перевищують 50 МПа. Це також стосується і прокатних двотаврів типу К з широкими поясами. Якщо шляхом спеціальних технологічних прийомів чи конструктивних заходів стискаючі напруження довести до величини не вище 50 МПа, то в розрахунку можуть використовуватися звичайні значення коефіцієнта φ , що може стати ефективним засобом зниження матеріалоємності виробу.

Вимога зниження коефіцієнта φ встановлена ще в роботі [5]. Проведені автором цієї роботи дослідження дозволили зробити такі висновки:

- залишкові напруження стиску в перерізі можуть суттєво знизити критичне навантаження;
- особливо помітний цей вплив при повздожньому згині у пружно-пластичній стадії в інтервалі гнучкості $50 < \lambda < 120$ при величині залишкових напружень стиску на кромках поясів на рівні 50 МПа;

- термічна обробка підвищує критичне навантаження Н-подібних елементів в інтервалі зазначених гнучкостей.

Однак призначення операції термообробки може істотно збільшити трудомісткість виготовлення виробу, особливо в умовах серійного виробництва.

У практиці проектування різноманітних конструкцій з метою зниження металоємності при збереженні несучої здатності прийнято використовувати попереднє напруження складових елементів. Як відмічається у роботі [6], в центрально- та позацентрово-стиснутих колонах в основному використовуються зварні двотаври з доволі товстими стінками ($\lambda_w \leq 60 \dots 70$) через необхідність забезпечення їх місцевої стійкості. Використання попереднього напруження підвищує ефективність колон: порівняно тонка стінка ($\lambda_w \leq 120 \dots 150$) попередньо нагрівається і зварюється із поясами зі сталі підвищеної міцності. Після охолодження стінка залишається розтягнутою, а пояси стиснутими. Під навантаженням стінка працює в області напружень $\sigma \leq \sigma_{ps} + \sigma_{cr}$ (σ_{ps} – попереднє напруження, σ_{cr} – критичне напруження для стінки). Завдяки попередньому напруженню витрати металу на колону можуть бути зменшені до 10%.

Аналіз технології виготовлення таких колон дозволяє зробити висновок про необхідність приділяти належну увагу забезпеченню місцевої стійкості полиць через те, що разом із напруженнями стиску від зварювання додатковий вплив на їх стійкість здійснюють усадочні явища при охолодженні стінки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роботи [7-11] розглядають роботу зварних елементів на стиск, але у більшій мірі присвячені методології комп'ютерного моделювання. Автори висвітлюють проблеми моделювання стійкості до вигину зварних колон, визначають відповідність прийнятих аналітичних рішень і результатів розрахунків методами скінченних елементів результатам проведених експериментальних досліджень, отримані результати використовують для розробки аналітичного формулювання кривих вигину, роблять висновки, що розрахунки необхідно проводити не тільки для випадків поширених сталей, а також і для інших видів сталі, особливо високоміцних сталей.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Дослідження, проведені як вітчизняними, так і закордонними вченими в різні роки [8], спрямовані, переважно, на моделювання та аналіз діаграм напружень та деформацій від зовнішнього навантаження для двотаврових перерізів із різним рівнем залишкових зварювальних напружень стиску. При цьому, в роботах майже відсутні дані стосовно технологічних засобів, спрямованих на зменшення напружень, що виникають у поясах конструкції (див. рис. 1).

Мета роботи. Встановити засоби зниження величини залишкових зварювальних напружень стиску у перерізах зварних двотаврових колон, визначити їхню ефективність та вплив на працездатність засобами комп'ютерного моделювання.

Виклад основного матеріалу. Робота виконувалась під час проектування виробничого комплексу з виготовлення металоконструкцій будівельного спрямування потужністю до 1000 т/рік у Чернігівській області.

Підбір перерізу суцільної колони складеного двотаврового перерізу з листової сталі С255, яка сприймає повздовжнє зусилля, виконано за методикою, наведеною в [1]. Величина зусилля $N = 1918,51 \text{ кН}$, опорна частина колони (база) жорстко защемлена, оголовок закріплено шарнірно. Відмітка верху колони +9,6 м, заглиблення бази -0,13 м. Коефіцієнт умов роботи $\gamma_c = 1,0$. Розрахунковий опір сталі $R_y = 240 \text{ МПа} = 24 \text{ кН/см}^2$. Модуль пружності сталі $E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа} = 2,06 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$.

За такої схеми закріплення коефіцієнт розрахункової довжини $\mu = 0,7$, відповідно розрахункова довжина колони $l_{ef,x} = l_{ef,y} = \mu l = 0,7 \cdot (960 + 13) = 681,1 \text{ см}$.

З конструктивних міркувань приймаємо $b = h = 30 \text{ см}$, $l_{ef,x} = l_{ef,y}$, тому втрата стійкості двотавра відбувається відносно осі у-у (рис. 2).

Наближений радіус інерції перерізу відносно осі у-у:

$$i_y = 0,24 \cdot b_f = 0,24 \cdot 30 = 7,2 \text{ см.}$$

$$\text{Гнучкість стержня } \lambda_y = \frac{l_{ef,y}}{i_y} = \frac{681,1}{7,2} = 94,6.$$

$$\text{Умовна гнучкість } \bar{\lambda}_y = 94,6 \sqrt{\frac{24}{2,06 \cdot 10^4}} = 3,23.$$

За табл. Д.6.1 [1] $\varphi = 0,596$.

Необхідна площа перерізу:

$$A_{cal} = \frac{N}{\varphi R_y \gamma_c} = \frac{1918,51}{0,596 \cdot 24 \cdot 1,0} = 134,12 \text{ см}^2 \approx 134 \text{ см}^2.$$

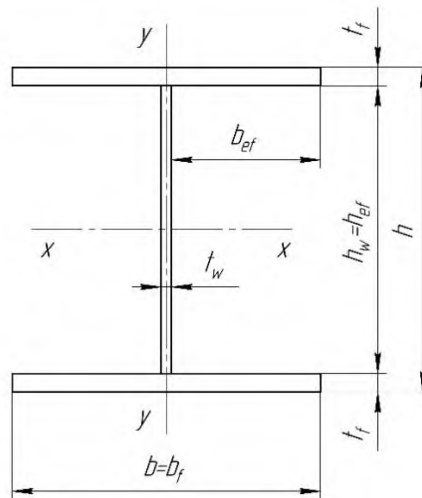


Рис. 2. Розрахункові розміри елементів перерізу

З використанням формул табл. 5.4 [1] для двотавра при $\bar{\lambda}_y = 3,23 > 2$ умовна гранична гнучкість стінки:

$$\bar{\lambda}_{iw} = 1,20 + 0,35 \bar{\lambda} = 1,20 + 0,35 \cdot 3,23 = 2,331 < 2,5.$$

Гранична гнучкість стінки:

$$\lambda_{iw} = 2,331 \sqrt{\frac{2,06 \cdot 10^4}{24}} = 68,29.$$

Приймаємо $h_w = 28 \text{ см}$. Тоді необхідна товщина стінки:

$$t_w \geq \frac{h_w}{\lambda_{iw}} = \frac{28}{68,29} = 0,41 \text{ см.}$$

Приймаємо $t_w = 1 \text{ см}$. Площа перерізу стінки у такому разі $A_w = 1 \cdot 28 = 28 \text{ см}^2$.

Площа перерізу поясу:

$$A_f = \frac{1}{2} (A_{cal} - A_w) = \frac{1}{2} (134 - 28) = 53 \text{ см}^2.$$

Необхідна товщина поясу:

$$t_f = \frac{A_f}{b_f} = \frac{53}{30} = 1,77 \text{ см} \approx 1,8 \text{ см.}$$

Виконуємо перевірку ширини звису за табл. 5.3 [1]:

$$\frac{b_{ef}}{t_f} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{(b_f - t_w)}{2 \cdot t_f} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{(30 - 1)}{2 \cdot 1,8} \sqrt{\frac{24}{2,06 \cdot 10^4}} = 0,275 < 0,36 + 0,1 \bar{\lambda}_y = 0,36 + 0,1 \cdot 3,23 = 0,683.$$

Отже місцева стійкість звису полиці забезпечується.

Виконаємо перевірку перерізу. Загальна площа поперечного перерізу при прийнятих розмірах стінки та полиць:

$$A = A_w + 2A_f = 28 + 2 \cdot 30 \cdot 1,8 = 136 \text{ см}^2.$$

Момент інерції перерізу бруто відносно осі y - y :

$$I_y = 2 \frac{1,8 \cdot 30^3}{12} = 8100 \text{ см}^4.$$

Радіус інерції перерізу відносно осі y - y :

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{8100}{136}} = 7,72 \text{ см}.$$

Умовна гнучкість стержня:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{l_{ef}}{i_e} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = \frac{681,1}{7,72} \sqrt{\frac{24}{2,06 \cdot 10^4}} = 3,01.$$

За табл. Д.6.1 [1] $\varphi = 0,641$.

$$\sigma = \frac{N}{\varphi A} = \frac{1981,51}{0,641 \cdot 136} = 22,01 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < R_y \gamma_c = 24 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Загальна стійкість колони забезпечується.

Переріз колони та його основні розміри представлені на рис. 3.

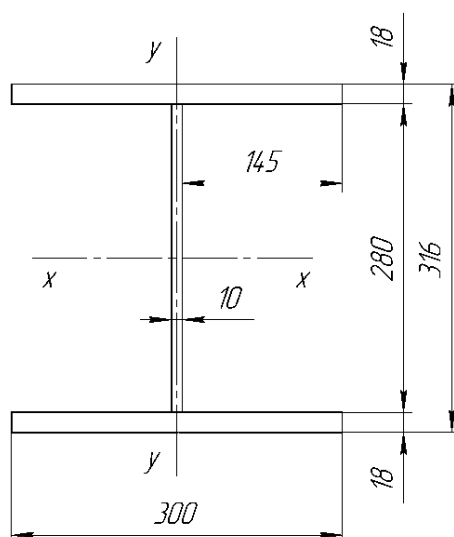


Рис. 3. Прийнятий переріз колони

При розрахунку стиснутих елементів треба враховувати впливи першого і другого порядку. Впливом першого порядку є випадковий ексцентриситет, який за нормами, наприклад, EN-1992-1-1 рекомендовано приймати:

$$e_y = \frac{l_{ef,y}}{400}. \quad (1)$$

Звідси

$$e_y = \frac{681,1}{400} = 1,7 \text{ см.}$$

Розрахунок на міцність позацентрово-стиснутих колон, які виконані із сталі з нормативною границею текучості R_{yn} до 440 МПа і не сприймають безпосередніх динамічних навантажень, при $\tau \leq 0,5R_s$ і $\frac{N}{A_n R_y} > 0,1$ слід виконувати з урахуванням обмежених пластичних деформацій [2]:

$$\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} + \frac{M}{c_y W_{yn, \min} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (2)$$

де A_n – площа поперечного перерізу нетто;

M – згинальний момент, $M = Ne_y$;

c_y – коефіцієнт, що залежить від типу перерізу, $c_y = 1,47$ [2];

$W_{yn, \min}$ – мінімальний момент опору перерізу нетто відносно осі y – y .

$$\frac{N}{A_n R_y} = \frac{1981,51}{136 \cdot 24} = 0,607 > 0,1.$$

$$W_{yn, \min} = 2 \frac{1,8 \cdot 30^2}{6} = 540 \text{ см}^3.$$

Тоді

$$\frac{1981,51}{136 \cdot 24 \cdot 1} + \frac{1981,51 \cdot 1,7}{1,47 \cdot 540 \cdot 24 \cdot 1} = 0,784 \leq 1.$$

Умова виконується.

Отримані проектні значення геометричних параметрів та навантажень були використані для моделювання напружено-деформованого стану конструкції колони за допомогою програмного комплексу SolidWorks. Для коректного порівняння результатів розрахунків використовувалась однакова сітка скінченних елементів. Поля напружень у місцях приєднання оголовка та бази до колони до уваги не приймалися.

За умови, що колона суцільного двотаврового перерізу з розмірами, представленими на рис. 3, буде не зварною, а монолітною, величина напружень на стиснутих кромках полиць буде досягати значення 175,4 МПа (рис. 4, а), максимальна величина деформації по вертикалі складатиме значення 7,75 мм (рис. 4, б), по горизонталі – 7,91 мм (рис. 4, в).

Усадка швів після зварювання викликає як повздовжні, так і поперечні напруження. З погляду працездатності зварної колони визначальними будуть повздовжні напруження.

Величина та характер розподілу цих напружень залежать від матеріалу, параметрів режиму зварювання та умов, у яких проводилося зварювання (зварювання у закріпленнях, у вільному стані, з використанням вигинів тощо). Утворення залишкових напружень після зварювання пов'язане з пластичною деформацією металу при нагріванні та охолодженні. Пластичні деформації прийнято вважати рівномірно розподіленими у межах зони пружно-пластичних деформацій F_m (див. рис. 1). Напруження у цій зоні досягають границі текучості [12]. За межами цієї зони діють зрівноважувальні напруження, а їх величина та розподіл визначаються умовами рівноваги.

У нашому випадку при зварюванні низьковуглецевої сталі зміна режиму зварювання впливає тільки на ширину цієї зони.

Визначення величини зони пружно-пластичних деформацій проведемо за умови, що поясні шви виконуються автоматичним дуговим зварюванням під шаром флюсу.

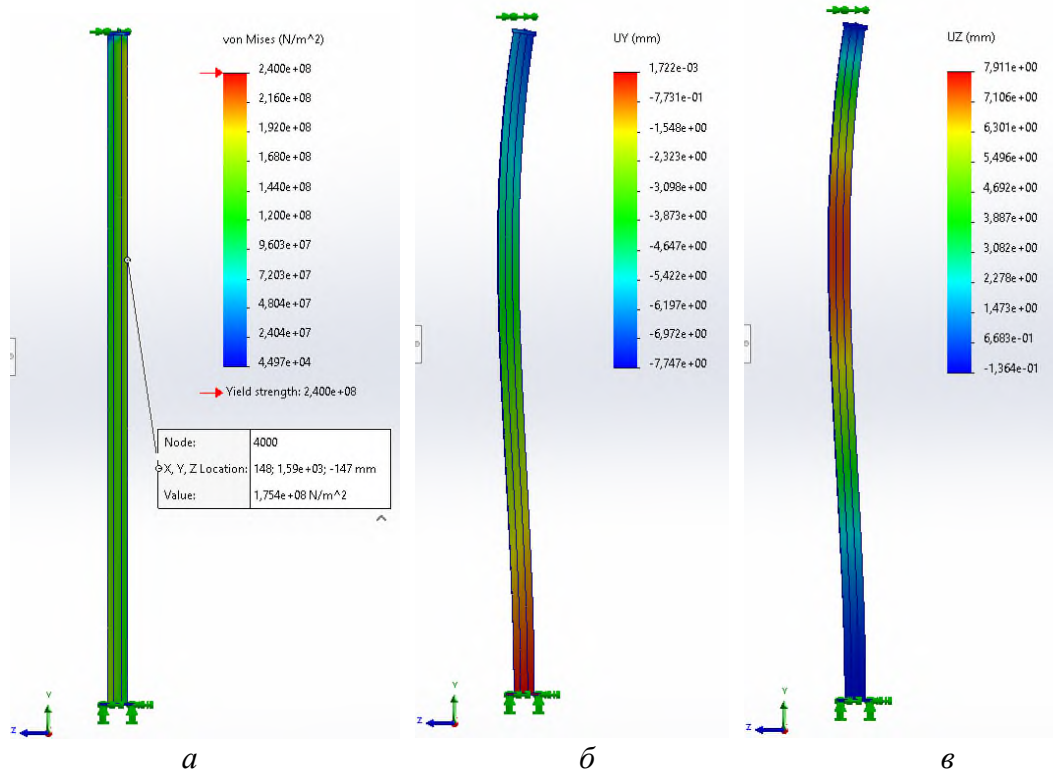


Рис. 4. Моделювання напруженого стану та деформування монолітної колони прийнятого двотаврового перерізу

Розглядаємо таврове з'єднання типу ТЗ з двосторонніми швами катетом $k = 10$ мм (рис. 5).

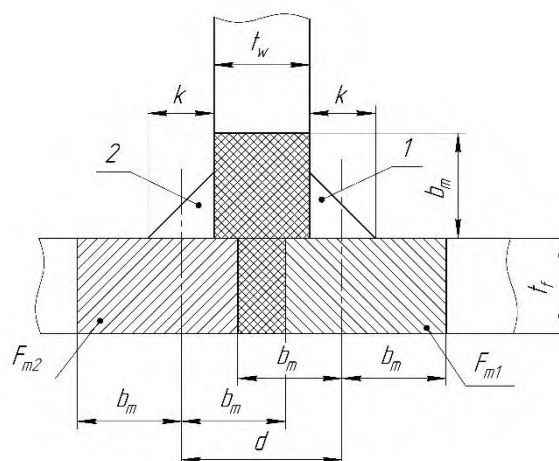


Рис. 5. Розміри зони пружно-пластичних деформацій таврового з'єднання ТЗ [12]

Розрахунок параметрів режиму зварювання виконано за методикою, наведеною в [13]: діаметр електродного дроту $d_{ел} = 5$ мм; зварювальний струм $I_{зв} = 700$ А; швидкість зварювання $V_{зв} = 27$ м / год = 0,75 см / с; теплова потужність дуги $q = 4700$ кал / с.

Погонна енергія при зварюванні:

$$q_n = \frac{q}{V_{зв}} = \frac{4700}{0,75} = 6266,7 \text{ кал / см} = 26257,47 \text{ Дж / см.}$$

Для низьковуглецевої сталі площа пружно-пластичної зони F_m визначається за виразом [12]:

$$F_m = \frac{1}{\left(\frac{1}{A_n} + \frac{y^2}{I_x} + \frac{1200}{q_n} \right)}, \quad (3)$$

де I_x – момент інерції перерізу відносно власної осі, перпендикулярної до осі вигину, $см^4$;
 y – відстань від осі шва до нейтральної осі зварної колони, $см$.

Момент інерції перерізу:

$$I_x = \frac{1 \cdot 28^3}{12} + 2 \left[\frac{30 \cdot 1,8^3}{12} + (14 + 0,9)^2 \cdot 30 \cdot 1,8 \right] = 25835,6 \text{ см}^4.$$

Тоді при симетричному двотавровому перерізі при виконанні першого шва

$$F_{m1} = \frac{1}{\left(\frac{1}{136} + \frac{0^2}{25835,6} + \frac{1200}{26257,47} \right)} = 18,85 \text{ см}^2.$$

Після виконання другого шва на тому ж режимі зона пружно-пластичних деформацій F_{m2} буде частково перекривати зону F_{m1} . Загальна площа зони при двосторонніх швах таврового з'єднання:

$$F_{m1,2} = m_{1,2} F_{m1}, \quad (4)$$

$$\text{де } m_{1,2} = 1 + \frac{(t_w + k)t_f}{F_{m1}} = 1 + \frac{(1+1)1,8}{18,85} = 1,191.$$

Звідси

$$F_{m1,2} = 1,191 \cdot 18,85 = 22,45 \text{ см}^2.$$

Відстань між осями швів:

$$d = t_w + k = 1 + 1 = 2 \text{ см.}$$

Протяжність зони на усі сторони:

$$b_m = \frac{F_{m1}}{t_w + 2t_f} = \frac{18,85}{1 + 2 \cdot 1,8} = 4,1 \text{ см.}$$

Отримані дані використали для моделювання напружено-деформованого стану колони при дії повздовжнього зусилля з урахуванням розподілення залишкових зварювальних напружень розтягу та стиску від виконання поясних швів (див. рис. 1). В пружно-пластичній зоні величина напружень розтягу досягає 240 МПа , на звисах полиць напруження стиску мають значення -120 МПа . Аналогічним чином залишкові напруження розподіляються у стінці колони.

Величина напружень на стиснутих кромках полиць буде досягати значення $176,6 \text{ МПа}$ (рис. 6, а), максимальна величина деформації по вертикалі складатиме значення $7,86 \text{ мм}$ (рис. 6, б), по горизонталі – $7,90 \text{ мм}$ (рис. 6, в).

У роботі [14] проведено узагальнення даних щодо забезпечення місцевої та загальної стійкості стиснутих елементів. У роботі вказується, що загальна стійкість залежить не стільки від величини зварювальних напружень стиску у перерізі, скільки від того, наскільки далі від осі, відносно якої імовірна втрата стійкості, знаходяться зони з напруженнями розтягу. Найпростіше, як вказується в роботі [5], це досягається за рахунок наплавлення на кромки полиць зварних валиків.

Розмір зони з напруженнями розтягу на кромках буде залежати від величини погонної енергії при зварюванні та геометричних характеристик її перерізу.

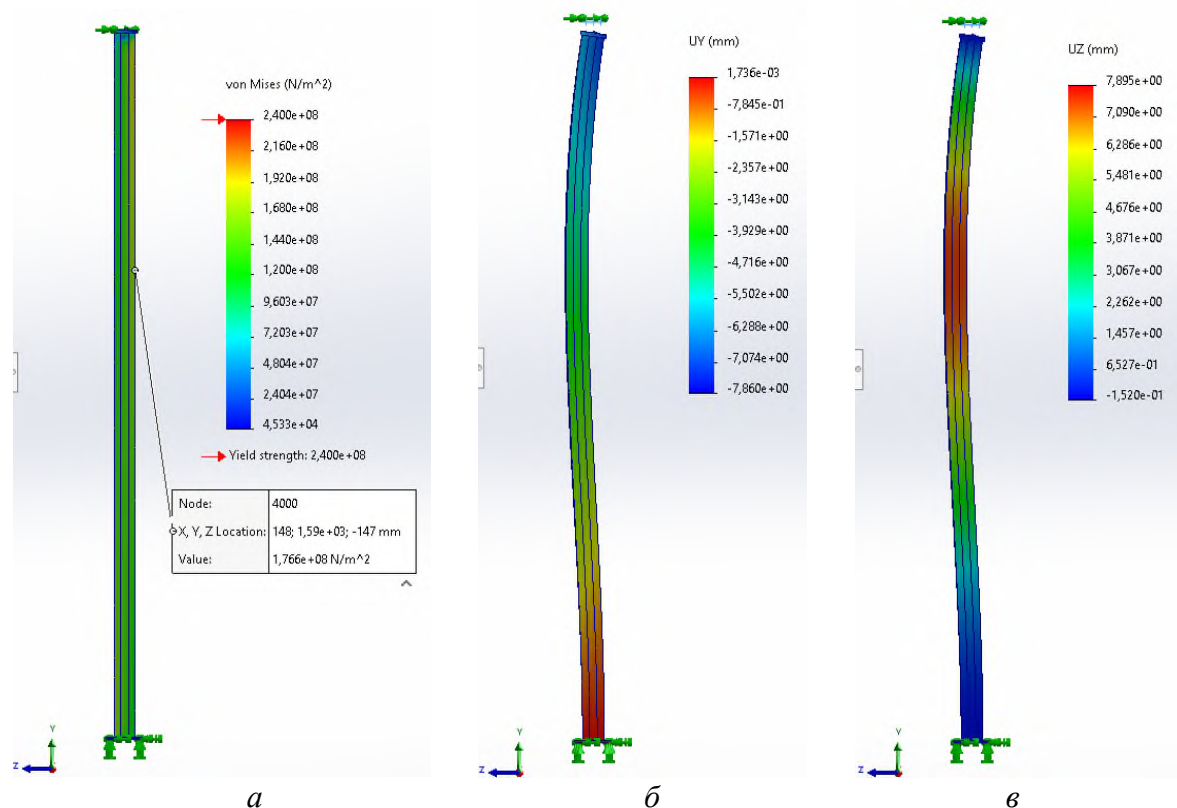


Рис. 6. Напружено-деформований стан колони з урахуванням залишкових зварювальних напружень

Припустимо, що наплавлення виконується на режимі з величиною погонної енергії 12000 Дж/см. За виразом (3) при симетричному розташуванні наплавлених на обидві кромки полиць валиків

$$F_m = \frac{1}{\left(\frac{1}{54} + \frac{1200}{12000}\right)} = 8,44 \text{ см}^2.$$

Протяжність зони пружно-пластичних деформацій по кромці полиці:

$$b_m = \frac{F_m}{t_f} = \frac{8,44}{1,8} = 4,7 \text{ см.}$$

Розподілення залишкових напружень після наплавлення валиків на кромки полиць у перерізі матиме вигляд, зображений на рис. 7.

У такому разі величина напружень на стиснутих кромках полиць знизиться до величини 156,2 МПа (рис. 8, а), максимальна величина деформації у вертикальній площині складатиме значення 6,46 мм (рис. 8, б), а у горизонтальній площині – 7,89 мм (рис. 8, в).

У відсотковому відношенні величина напружень на кромках полиць знижується на 11,6 % порівняно з їхньою величиною без наплавлення валиків. У свою чергу такий результат відкриває можливості для зниження матеріалоемності колони.

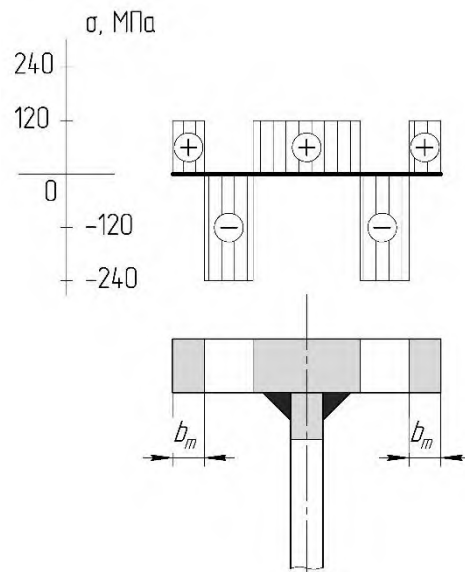


Рис. 7. Розподіл залишкових напружень у перерізі після наплавлення валиків на кромки полиць

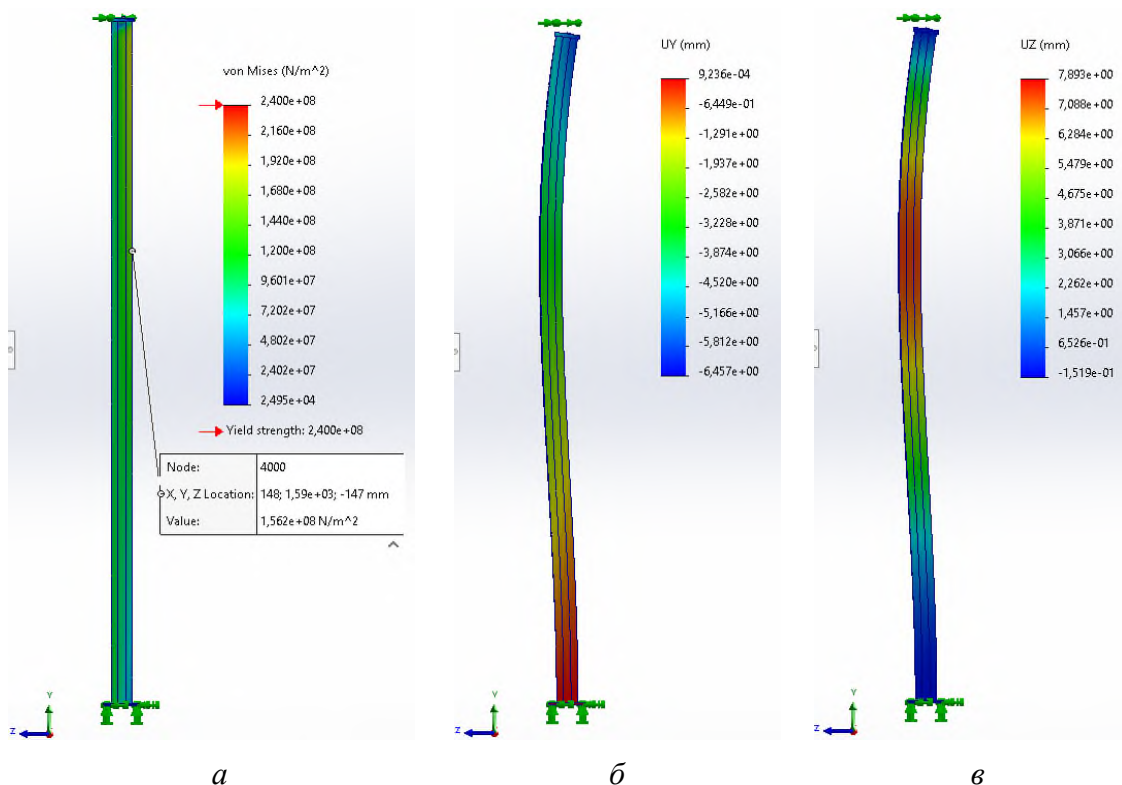


Рис. 8. Напружено-деформований стан колони після наплавлення валиків на кромки полиць

Нижче представлені результати моделювання напруженого стану у поперечному перерізі колони, у якій товщина полиць прийнята 16 мм. Прийнято ті самі параметри режиму зварювання кутових поясних швів та наплавлення валиків на кромки полиць. Зміна товщини полиць, відповідних геометричних характеристик перерізу та розмірів зон з напруженнями розтягу та стиску були враховані при моделюванні.

Так, у випадку прийнятої товщини полиці 18 мм без наплавлення валиків на кромки величина напружень стиску складає 176,3 МПа (рис. 9, а), а у випадку колони з товщиною полиці 16 мм з наплавленням валиків на кромки – 174,3 МПа (рис. 9, б).

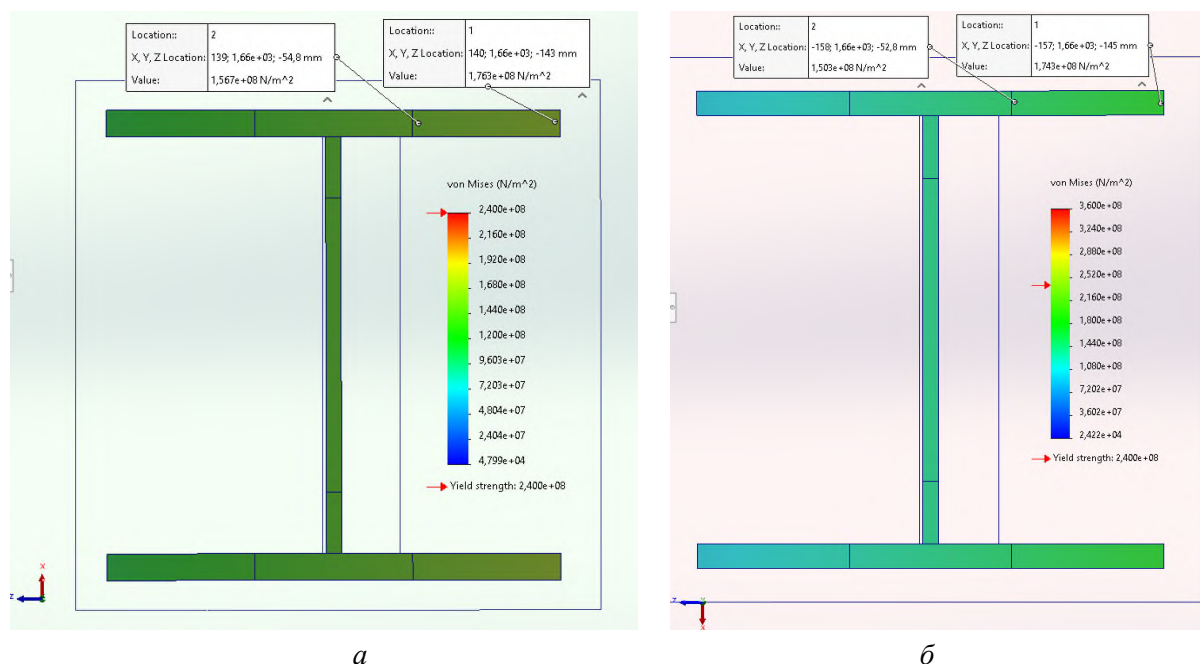


Рис. 9. Напруження на кромках полиць товщиною 18 мм без наплавлення валиків (а) та товщиною 16 мм з наплавленням валиків (б)

Таким чином при товщині полиць 16 мм витрати металу на колону можуть бути зменшені до 8,8 %.

Висновки. Отримані результати дозволяють розглядати наплавлення валиків на кромки полиць як ефективний засіб підвищення загальної стійкості колон та зниження їх матеріалоемності зі збереженням несучої здатності при заданих навантаженнях.

При відпрацюванні технології виготовлення колони поряд з використанням дугового наплавлення стосовно впливу на розподіл напружень у перерізі ретельного аналізу потребують термічні джерела з різним ступенем концентрації теплової енергії у точці нагріву.

Для оцінки ефективності обраної технології виготовлення зварної двотаврової колони необхідно провести техніко-економічне обґрунтування варіантів виробництва колони на основі таких вихідних даних, як вартість матеріалів та енергетичних ресурсів, трудомісткість процесів, подовження термінів виготовлення одиниці продукції тощо.

Список використаних джерел

- Нілов, О. О. Металеві конструкції. Балки. Колони : навч. посіб. для вищих навчальних закладів / О. О. Нілов, Т. О. Нілова. – Видання 2-е, перероблене і доповнене. – Київ : Логос, 2013. – 240 с.
- Металеві конструкції : Т. 2. Конструкції металевих каркасів промислових будівель : Підручник для вищих навчальних закладів / С. І. Білик, О. В. Шимановський, О. О. Нілов [та ін.] ; за ред. О. В. Шимановського, С. І. Білика, О. О. Нілова. – Кам'янець-Подільський : ТОВ «Друкарня «Рута», 2021. – 448 с.
- ДБН В.2.6-198:2014. Зі зміною №1. Сталеві конструкції. Норми проектування. – Київ : Мінрегіон України, 2022. – 223 с.
- Окерблом, Н. О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций / Н. О. Окерблом. – М.–Л. : «Машиностроение», 1964. – 420 с.
- Шелестенко, Л. П. Влияние собственных остаточных напряжений на общую устойчивость сжатых сварных H-образных элементов / Л. П. Шелестенко // Железнодорожное строительство. – 1954. – № 2. – С. 22-24.

6. Металлические конструкции : в 3 т. Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / под общ. ред. В. В. Кузнецова. – М. : Изд-во АСВ, 1998. – 512 с.
7. Zheng, B. Test and design of stainless steel welded i-columns / B. Zheng, G. Shu, X. Shen // *Advanced Steel Construction*. – 2015. – Vol. 11(4). – Pp. 427-440.
8. Szczerba, Radosław. On modelling of the buckling resistance of welded I-section columns / R. Szczerba, M. Gajewski, M. Giżejowski // *MATEC Web of Conferences*. – 2018. – Vol. 219.
9. Yidu Bu Finite element modelling and design of welded stainless steel I-section columns / Yidu Bu, Leroy Gardner // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2019. – Vol. 152. – Pp. 57-67.
10. Kollár, Dénes Experimental and numerical simulation of welded columns / Kollár, Dénes, B. Kövesdi // *Conference: 41st International Conference ZAVARIVANJE – WELDING 2016, CWS2016 At: Opatija, Croatia, June 2016*.
11. Xiang Yun. Welded steel I-section columns: Residual stresses, testing, simulation and design / Xiang Yun, Yufei Zhu, Xin Meng, Leroy Gardner // *Engineering Structures*. – 2023. – Vol. 282.
12. Напруження та деформації при зварюванні і паянні : підручник / Л. М. Лобанов, Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький [та ін.] ; за заг. ред. Л. М. Лобанова. – Миколаїв : НУК, 2016. – 248 с.
13. Проектування технологічних процесів зварювального виробництва : метод. вказівки до практ. занять для здобувачів вищ. освіти другого (магістер.) рівня спец. 131 «Прикладна механіка» за освіт.-проф. програмою «Технології та устаткування зварювання» / уклад. : С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – 48 с.
14. Новомлинець, О. О. Проектування технологічних процесів зварювального виробництва : навч. посіб. / О. О. Новомлинець, С. В. Олексієнко, С. М. Ющенко. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – 130 с.

References

1. Nilov, O.O. (2013). *Metalevi konstruktyi. Balky. Kolony : navchalnyi posibnyk dlya vyshchyykh navchsl'nykh zakladiv [Metal structures. Beams. Columns : textbook for higher education institution]*. Logos.
2. Bilyk, S.I., Shymanovskyi, O.V., Nilov, O.O. et al. (2021). *Metalevi konstruktyi: T. 2. Konstruktyi metalevykh kerkasiv promyslovykh budivel [Metal structures : Vol. 2. Structures of metal frameworks of industrial buildings]*. TOV «Drukarnia “Ruta”».
3. DBN V.2.6-198:2014. Zi zminoiu №1 (2014). *Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia [Steel structures. Design standarts]*.
4. Okerblom, N.O. (1964). *Konstruktivno-tekhnologicheskoe proektirovanie svarnykh konstruktsii [Constructive and technological designing of welded structures]*. Mashinostroenie.
5. Shelestenko, L.P. (1954). Vliyanie sobstvennykh ostatochnykh napryazhenii na obshchuyu ustoichivost szhatykh svarnykh H-obraznykh elementov [The influence of own residual stresses on the overall sustainability of compressed welded H-shaped elements]. *Zheleznodorozhnoie stroitelstvo – Railway construction*, (2), 22-24.
6. Kuznetsov, V. V. (Ed.). (1988). *Metallicheskie konstruktsii. T. 2. Stalnie konstruktsii zdaniy i sooruzheniy (Spravochnik proektirovshchika) [Metal structures. Vol. 2. Steel constructions of buildings and structures (The handbook for designer)]*. Izd-vo ASV.
7. Zheng, B., Shu, G., & Shen, X. (2015). Test and design of stainless steel welded I-columns, *Advanced Steel Construction*, Vol. 11(4), 427-440.
8. Szczerba, R., Gajewski, M. & Giżejowski, M. (2018). On modelling of the buckling resistance of welded I-section columns, *MATEC Web Conf.*, 219.
9. Bu, Yidu, & Gardner, Leroy (2019). Finite element modelling and design of welded stainless steel I-section columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 152, 57-67.
10. Kollár, D., & Kövesdi, B. (2016). Experimental and numerical simulation of welded columns. *Conference: 41st International Conference ZAVARIVANJE – WELDING 2016, CWS2016*.
11. Yun, Xiang, Zhu, Yufei, Meng, Xin, & Gardner, Leroy. (2023). Welded steel I-section columns: Residual stresses, testing, simulation and design. *Engineering Structures*, 282.
12. Lobanov, L. M., Yermolaiev, G. V., Kvasnytskyi, V. V. et al. Ed. by Lobanov, L. M. (2016). *Napruzhennia ta deformatsii pry zvariuvanni i paianni [Stresses and strains during welding and soldering]*. NUK.
13. Oleksiienko, S.V., & Yushchenko, S.M. (2021). *Proiektuvannia tekhnolohichnykh protsesiv zvariuvannoho vyrobnytstva: metodychni vказivky [Design of welding production processes: methodical instructions]*. NU “Chernihivska politekhnika”.

14. Novomlynets, O.O., Oleksienko, S.V., & Yushchenko, S.M. (2023). *Proiektuvannia tekhnolohichnykh protsesiv zvariuvalnogo vyrobnytstva: metodychni vказivky [Design of welding production processes: methodical instructions]. NU "Chernihivska politekhnika".*

Отримано 21.12.2024

UDC [624.075.23:621.79]:004.94

**Serhii Oleksienko¹, Mykhailo Rudenko², Svitlana Yushchenko³,
Maksym Bolotov⁴, Mykola Korzachenko⁵**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: sv.oleks@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>
ResearcherID: [F-8197-2014](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439). **SCOPUS Author ID:** [57190370561](https://orcid.org/0000-0001-5475-4439)

²Senior Lecturer of Welding Technologies and Construction Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: m.rudenko@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>
ResearcherID: [G-6235-2014](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792). **SCOPUS Author ID:** [57190378153](https://orcid.org/0000-0001-9542-7792)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: rasssveta@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0863-9020>
ResearcherID: [F-7741-2014](https://orcid.org/0000-0003-0863-9020). **SCOPUS Author ID:** [57190373626](https://orcid.org/0000-0003-0863-9020)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: m.bolotov@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>
ResearcherID: [AAJ-6633-2020](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132). **SCOPUS Author ID:** [57190377278](https://orcid.org/0000-0002-0915-4132)

⁵PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: korzachenko_87@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5674-8662>
ResearcherID: [F-5177-2016](https://orcid.org/0000-0002-5674-8662). **SCOPUS Author ID:** [57330883100](https://orcid.org/0000-0002-5674-8662)

**CAE ANALYSIS OF EXPLOITATION OF I-BEAM COLUMN
WITH THE REGULATED FIELD OF RESIDUAL STRESSES
IN ITS CROSS-SECTION**

Columns are vertical elements that support the structures on them, perceive the loads and transfer them to the basement. Relatively long elements, the length of which is several times higher rather than its cross-section dimensions, lose their bearing capacity because of stability loss at the stresses that are significantly less than the yield strength of the steel itself. Critical stresses in such elements in each specific case are determined using the longitudinal bending coefficient.

The underestimated values of longitudinal bending coefficients are used while calculating the stability of welded elements of solid sections. Residual compressive welding stresses from the belt joints of welded I-beam H-section columns reduce their stability and load-bearing capacity if the residual stresses at the edges of the flanges exceed critical values. If the compressive stresses at the edges of the shelves are reduced by special technological or design means, so then the usual values of the longitudinal bending coefficient can be used in the calculation, which can be an effective means of reducing the material consumption of the product.

This paper establishes that the overall stability of compressed elements depends not so much on the magnitude of the welding compressive stresses as on how far from the axis to which the loss of stability is more likely the tensile stress zones are located.

Using computer modeling of the stress-strain state that occurs during the operation of welded I-beam columns, the effectiveness of the application of the welding rollers on the edges of the shelves was established. The latter provides for increasing the overall stability of the columns, which has been determined. The zones with tensile stresses are formed on the edges of the shelves after welding of the rollers, and their size will depend on the amount of direct energy during welding. The possibility of reducing the material consumption of columns has been established.

Keywords: welded column; solid cross-section; stability; residual stresses; material consumption.

Fig.: 9. **References:** 14.

Andrii Ivanko¹, Mykola Zenkin², Maksym Chernysh³, Illia Kolinko⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Printing Machines and Automated Complexes National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: ivanko.andrii@lil.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4735-9665>. **Researcher ID:** K-1024-2017

²Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head 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>. **SCOPUS Author ID:** [6506189455](https://orcid.org/0000-0002-8840-0572)

³Graduate student of the Department of Printing Machines and Automated Complexes National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: maxim073074@gmail.com

⁴Master student of the Department of Printing Machines and Automated Complexes National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: hotarn22@gmail.com

IMPROVEMENT OF THE PNEUMATIC DRIVE OF A FLAT DIE-CUTTING PRESS

For more efficient operation of the device, it is recommended to use cylinders with the lowest working pressure and a larger piston area to reduce the preparatory time. The pneumatic drive can significantly improve the cutting process due to the proposed design of the pressing plate with perforation grooves. The cutting method is more environmentally friendly due to the use of compressed air as the primary working force. The operational efficiency of the drive is ensured by the design features of the pressing plate, specifically its enhanced functionality through the introduction of a pneumatic chamber into its base. This new technical solution allows the creation of an air cushion analog during cardboard cutting, thus increasing the durability of the cutting tools.

Keywords: cardboard blank; pressing plate; die-cutting press; pneumatic cylinder; compressed air; pneumatic chamber; reverse motion; piston, rod.

Fig.: 3. References: 11.

Urgency of the research. A wide range of printing equipment is used for the production of cardboard packaging. Clamshell presses remain the primary type of equipment, as they are relatively simple to use. However, the main operating mechanism - the clamshell press - is highly loaded, energy-intensive, and requires significant modernization.

Target setting. Accelerated dulling of cutting elements is one of several issues encountered when using traditional die-cutting technology. The contact method of knife-against-anvil creates operational difficulties in the technological process of packaging production.

The task is to develop an energy-efficient drive for the pressing plate based on pneumatic cylinders.

Actual scientific researches and issues analysis. Pneumatic drives or systems include automatic control, stabilization, and regulation systems for working executive elements, which operate using compressed air [1-2]. Pneumatic cylinders with reciprocating motion of the output link have two fixed end positions of the piston. Due to the elasticity of the working medium, it is challenging to stop the piston at a specific position, even when the pneumatic supply and exhaust lines are closed. Thus, a rational choice of the pneumatic cylinder's structural dimensions and the use of regulating devices are necessary to improve their operational dynamics.

A geometric synthesis of the wedging mechanism of the pressing plate drive has been performed [3]. The work identified the effects of deformation in ejector cushions of the die-cutting form and the cutting and creasing of cardboard on the mechanism's component loads. The nature of the pressing plate drive's load during cardboard blank die-cutting was investigated.

Flat die-cutting presses are widely used in the printing and packaging industry. Significant technological loads occur in such presses. Therefore, the drives' designs are aimed at overcoming substantial technological forces in the pressing plate while applying minimal force to the input drive link [4, 5]. The goal is to ensure planar-parallel movement of the pressing plate over large contact areas.

The advantages and disadvantages of existing wedging mechanisms for flat die-cutting presses were analyzed in [6]. A wedging cam mechanism for driving the lower movable pressing plate was developed. The technological loads for die-cutting operations were determined, and the driving forces in the proposed wedging mechanism were analyzed.

The use of a combined lever mechanism eliminates the drawback of non-parallel pressing plate movement [7]. Thus, a combined lever mechanism was used for the die-cutting press's movable plate drive. It consists of two pairs of crank-slider circuits: driving and executing. Kinematic calculations confirmed that the sliders move at identical speeds, maintaining the plate's parallelism during movement.

To reduce additional forces on the movable pressing plate mechanism, the use of driving cams and wedging levers was proposed [8]. By selecting a periodic motion law for the executive links, die-cutting forces are reduced.

The values of torques on the drive shaft were experimentally established [9]. The influence of drive speed parameters on the pressing plate's force loads was determined. A screw-nut drive mechanism for the movable pressing plate was proposed in [10], establishing the impact of cardboard blank thickness on the dynamic loads in the drive. Increasing the cardboard thickness leads to higher loads in the pressing plate drive.

Uninvestigated parts of general matters defining. A new method of cardboard blank die-cutting and a pressing plate mechanism were proposed [11]. The non-contact die-cutting technology eliminates support contact elements. A pneumatic drive was suggested for the die-cutting process. However, this method requires further experimental research.

The research objective. The aim of this study is to improve the pneumatic drive of a flat die-cutting press for higher-quality die-cutting of cardboard blanks. It proposes replacing articulated cyclic mechanisms with an enhanced pneumatic drive. The use of pneumatic cylinders for the pressing plate aims to refine the drive and improve overall performance.

The statement of basic materials. The technological process of die-cutting cardboard blanks in a flat die-cutting press involves a pneumatic chamber filled with compressed air. The generated pressure acts on the cardboard sheet during knife penetration. Simultaneously, an air cushion holds the sheet as blades penetrate it. Separation of the sheet occurs due to elastic materials and ejector cushions.

The proposed drive includes four pneumatic cylinders (1) comprising the pressing plate drive station. Each pneumatic cylinder is connected to the plate via fastenings (2). To create an air cushion interacting with the sheet, the fastenings (2) are equipped with internal channels for compressed air supply (not shown in the diagram). The pressing plate body (3) contains perforated slots (5) for passing die-cutting blades (7). The cavity (4) creates the necessary pressure, while ejector cushions (6) hold the sheet in the die-cutting plane. Guides (8) in the combined drive regulate the pressing plate's height above the die-cutting plane.

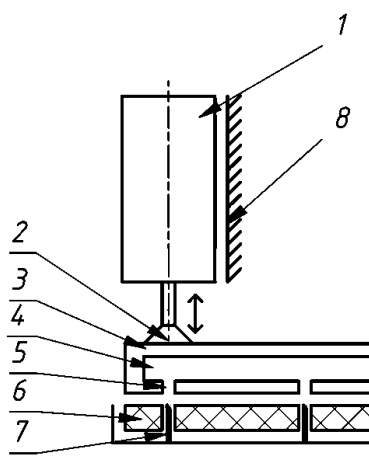


Fig. 1. Technological scheme of the pneumatic drive of a flat die-cutting press
Source: developed by the authors.

The dynamic operation of a standard double-acting piston pneumatic drive ensures the pressing plate's reverse movement according to the durations of strokes t_1, t_2, t_3, t_4 . The sum of stroke durations constitutes the technological cycle period T_c of the pneumatic device, determining its productivity [11].

The primary goal of calculating a pneumatic drive is to select the effective piston area and the cross-sections of the supply f_n^e and exhaust f_v^e pipelines at a given piston speed, which will be considered constant and subject to a stable resistance force. In this case, it is necessary to account for the features of the improved pneumatic drive. Modeling the drive requires considering a specific combination of initial parameters, namely: the average piston speed v_{avg} , its stroke S , the mass m_p of the moving parts, and initial conditions.

The first two assumptions are: 1) The pressure in the filling chamber equals atmospheric pressure, while the pressure in the exhaust chamber equals the mainline pressure. 2) The pressure in the common chambers is atmospheric.

Under the first class of conditions, the piston moves close to a stationary (uniform) state. Therefore, it is initially necessary to assess the feasibility of achieving such uniform (stationary) motion under the given initial parameters. The values of dimensionless parameters N, Ω , and χ determine the variation in operation speed. The dimensionless structural parameter N is calculated as follows:

$$N = 275.4 \cdot \mu_1 \cdot \frac{d_1}{D_1^3} \cdot \sqrt{\frac{P}{p_M \cdot S}}; \text{ where: } \mu_1 - \text{ the discharge coefficient of the exhaust line; } d_1 - \text{ the}$$

exhaust line diameter (m); D – the piston diameter (m); P – the total resistance force on the rod (N); p_M – the mainline pressure (MPa); S – the piston stroke (m). The dimensionless parameter Ω , which characterizes the throughput capacities of the supply and exhaust lines, is given by:

$$\Omega = \mu_n \cdot \frac{f_e}{\mu_e \cdot f_n} = \frac{f_v^e}{f_n^e}; \text{ where: } \mu_n, \mu_e - \text{ the discharge coefficients of the supply and exhaust}$$

lines, respectively, f_n^e, f_v^e are the effective areas of their cross-sections.

The dimensionless parameter χ , representing the load on the rod, is given by: $\chi = \frac{P}{p_M \cdot F}$;

where $F = \pi \frac{D^2}{4}$ - the piston area on the side where the higher air pressure acts.

With sufficient accuracy for calculations, the condition for ensuring a piston motion mode close to steady-state can be expressed as: $\delta \leq \delta_y$; where δ - inertia criterion of the pneumatic drive, numerically equal to:

$$\delta = v_{avg} \cdot \sqrt{\frac{m_p}{P \cdot S}} \tag{1}$$

where m_p - the mass of all moving parts of the pneumatic drive (piston, rod), and v_{avg} - the average piston speed.

For the initial pressure conditions in the chambers, based on known experimental data, a critical value δ_y , has been established. Exceeding this value makes it impossible to achieve piston motion close to uniform. When using equation, it should be noted that the values of m_p and P are not yet known prior to selecting the diameter.

In the general case, the total resistance force P is equal to:

$$P = P_1 + P_{res} + P_g + p_a \cdot F_{ex}; \tag{2}$$

where P_1 - the frictional force in the piston and rod seals; P_{res} - the useful resistance force; P_g - the gravitational force of the piston and rod (considered for the vertical arrangement of pneumatic cylinders); F_{ex} - the opposing force due to pressure in the exhaust chamber. When the useful resistance force P_{res} dominates, the calculation of P_1 can be performed using empirical relationships: $P = 3.5\sqrt{P_{res}}$.

For selecting the parameters of the pneumatic drive based on a given piston speed v_{avg} and resistance force P refined calculations are necessary. Additionally, for any arbitrary piston area F that must exceed the minimum value determined by the condition of providing sufficient driving force to overcome resistance, the drive can be tuned to the desired piston speed by selecting effective cross-sectional areas of the pneumatic lines at the inlet f_n^e and the outlet f_v^e . For each value of F multiple configurations are possible, characterized by different ratios of f_n^e i f_v^e .

The quantitative relationships between F f_n^e and f_v^e are described by dimensionless dependencies. The dimensionless effective cross-sectional area of the inlet line U_y is $U_y = f_n^e \cdot a_1$; where $a_1 = \frac{K \cdot p_m}{P \cdot v_{avg}}$ - proportionality coefficient.

As the parameter Ω , characterizing the throughput of the inlet and exhaust lines, increases while keeping other input data unchanged, the value of f_n^e decreases. Conversely, as Ω , decreases f_n^e increases. This is explained by the reduction in backpressure in the exhaust chamber, which impedes the piston's motion as the cross-sectional area of the exhaust channel increases relative to the inlet channel.

We determine the effective minimum cross-sectional area $f_{n.min}^e$ of the pipeline: $f_{n.min}^e = \frac{U_{y.min}}{a_1}$, which delivers compressed air to the cylinder, and the optimal piston area F_{onm} : $F_{onm} = \frac{1}{\frac{\chi_{onm}}{a^2}}$, which corresponds to the cylinder diameter:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{onm}}{\pi}} \tag{3}$$

We round the value of D to the nearest larger size from the standard range. The rod diameter d_{rod} is selected according to recommendations: $d_{rod} = (0.2...0.3) \cdot D$.

The structural dimensions of the pneumatic line elements, i.e., the areas of their cross-sections f_i , are calculated based on the adopted connection scheme of the elements and considering the condition $f_n^e \geq f_{n.calc}$, where $f_{n.min}^e = f_{n.calc}$ the effective cross-sectional area of the inlet line determined from the dynamic calculation of the pneumatic drive. Let us consider the simplest case, where this line includes only elements with identical cross-sectional areas connected in series: $f_1 = f_2 = f_3 = \dots = f_n$. The equivalent length of the pipelines, equivalent to the entire line, is always greater than the physical length of the pipes in the real system.

Having calculated using the formula $f_{n.min}^e = \frac{U_{y.min}}{a_1}$, we select the types of pneumatic devices and determine the equivalent (effective) length of the pipeline L_{eq} . Then, for $f_{n.min}^e$ and L_{eq} we find the flow coefficient μ_n and the cross-sectional area of the pneumatic line f using the formula: $f = \frac{f_{n.min}^e}{\mu_n}$, and also the diameter of the pneumatic line d_y using the formula: $d_y = \sqrt{\frac{4 \cdot f}{\pi}}$. The obtained diameter d_y is rounded to the nearest larger value according to the standards.

In a double-acting pneumatic drive, after the pneumatic distributor is triggered, air is supplied from the main line through the pipeline to the working cylinder chamber. As soon as the distributor port opens, pressurized air starts moving. For some time, the opening of the distributor and the propagation of the compressed air pressure wave to the working cylinder occur simultaneously but end at different times. The pressure wave arises after the distributor port is fully open. Since the distributor ports in most pneumatic drives open quickly relative to the operating cycle, this does not lead to significant delays in operation. The time intervals for these operations can also be individually determined according to this assumption: t_{valve} - the valve activating (opening) time, and $t_{pressure\ wave}$ - the time for the pressure wave to propagate from the valve to the pneumatic cylinder.

The pressure in the working chamber of the pneumatic cylinder increases as soon as the valve opens, and the piston begins to move. This time is referred to as the working chamber filling time, t_{fill} . The sum of the listed time intervals is called the preparatory period, t_{prep} :

$$t_{prep} = t_{valve} + t_{pressure\ wave} + t_{fill} \tag{4}$$

The relationship between the design parameters of the device determines whether the pressure rises monotonically or fluctuates during the piston movement period. The pressure in the chamber connected to the main pipeline increases to the level set by the technological conditions as soon as the piston completes its stroke, S . In the chamber of the second (exhaust) cylinder, the pressure decreases to atmospheric pressure.

The time for the pressure wave to propagate from the valve to the working pneumatic cylinder is determined by the known formula: $t_{pressure\ wave} = \frac{L_t}{a}$; where L_t - the length of the pipeline from the valve to the cylinder, and a is the speed of the air flow propagation and a - the speed of the air flow propagation.

The pressure at the inlet is constant and equal to the main pressure during the filling of the initial volume of the working chamber with compressed air. The compressed air volume is equal to the volume of the pipeline, and the flow coefficient can account for calculation errors.

In the initial phase, there is a simultaneous increase in pressure in the working chamber and a decrease in pressure in the exhaust chamber. In this case, the driving force overcomes the resistance forces, and the piston moves when a pressure differential is created in both chambers. To establish the appropriate pressure differential, it is necessary to determine when the working chamber should be filled, and when the compressed air should exit the exhaust chamber. The filling time of the working chamber with compressed air is determined by the formula:

$$t_{fill} = \frac{3.62 \cdot 10^{-3} \cdot V_{01}}{f \cdot \mu_n (\psi_1(\sigma_2) - \psi_2(\sigma_1))} \tag{5}$$

where V_{01} - the initial volume of the working chamber, μ_n - the air flow coefficient in the pneumatic line; f - the cross-sectional area of the supply pneumatic line, and σ_1 and σ_2 - the

relative initial and final pressures in the working chamber of the cylinder. The values of the functions $\psi_1(\sigma)$ and $\psi_2(\sigma)$ can be found graphically according to recommendations [1, 2].

Using nomograms allows selecting the calculated pressure in both chambers of the pneumatic cylinder at the moment when the piston begins to move. Since the nomograms are built in dimensionless quantities, we first consider the load χ , which is the ratio of the maximum force F the resultant force P , acting on the piston.

To determine the preparatory period time for a typical double-acting pneumatic drive, we use the results from dynamic synthesis as initial data. Accordingly, we have: piston diameter $D = 0.08$ m; rod diameter $d_{rod} = 0.02$ m; piston stroke $S = 0.03$ m; air flow coefficient of the supply line $\mu_n = 0.08$; air flow coefficient of the exhaust line $\mu_e = 0.26$.

Next, we find the initial volumes of the working and exhaust chambers, taking into account the volumes of the pipelines from the cylinder to the valve. The initial volume of the working chamber is calculated according to the recommendations [11] and the dimensionless load on the piston is

$$\text{determined by the formula: } \chi_1 = \frac{P}{p_m \cdot F_1}.$$

We determine the values of relative pressures at the moment the piston begins to move by first

calculating:
$$\nu = \frac{V_1}{V_v} \cdot \Omega = \frac{f_v \cdot V_{01} \cdot \mu_v}{\mu_n \cdot f \cdot V_v}.$$
 The dimensionless area parameter is:

$$\Pi_{2,1} = \frac{F_2}{F_1} = \frac{D^2 - d_{rod}^2}{D^2}.$$

According to the aforementioned recommendations, for $\chi = 0.37$ and $\nu = 0.57$ we find $\sigma_{pd}^n = 0.97$ and $\sigma_{vd}^n = 0.32$ taking into account that $\Pi_{2,1} = 0.938$. By comparing the filling and emptying times of the working cylinder chambers, we choose the larger value.

Figure 2 shows the dependence of the deformation strength S of sheet material on the destructive force of the knife F . It is assumed that the destructive force of sheet material during stretching should be experimentally determined as the arithmetic mean of ten measurement results.

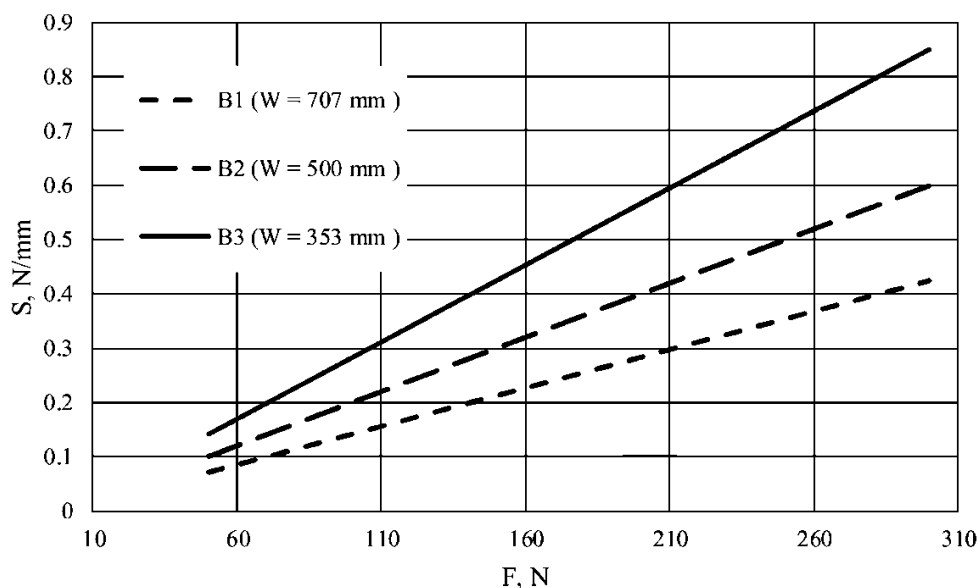


Fig. 2. Dependence of the ultimate deformation stretching strength S of sheet material on the destructive force F for format B1, B2 and B3

Source: developed by the authors.

For our theoretical calculations, we consider the deformation of the edge of the sheet when subjected to the cutting tool. In other words, the strength of the sheet material during stretching

is calculated using the formula: $S = \frac{F}{W}$; where W – the width of the sheet material (mm), and

F is the destructive force acting on the sheet (N). We also take into account the tensile strength limit of the sheet and its thickness. The rupture length is calculated using the following relation:

$$L = \frac{1}{9.8} \cdot \frac{F}{W \cdot g} \cdot 10^3; \text{ where } g \text{ – the mass of the paper per unit area (1 m}^2\text{)}.$$

The dependence of the deformation strength S (N/mm) on the destructive force F (N) under the action of the knife is examined for different sheet formats: $W_1 = 707\text{mm}$, $W_2 = 500\text{mm}$ and $W_3 = 353\text{mm}$. For the sheet format $B1$ ($W_1 = 707\text{mm}$) the ultimate deformation strength S varies from 0.071 N/mm to 0.424 N/mm. For format $B2$ ($W_2 = 500\text{mm}$) the value of S varies from 0.1 N/mm to 0.6 N/mm and for $B3$ ($W_3 = 353\text{mm}$) the ultimate values of S range from 0.142 N/mm to 0.85 N/mm.

Thus, for the minimum ultimate edge rupture during punching of format $B3$, the value of S is 70.42% higher than when punching $B2$, and the maximum deformation value is 70.59% higher, respectively. Also, the minimum deformation rupture value when punching format $B2$ is 71% higher than when punching $B1$, and the maximum value is 70.67% higher, respectively.

Figure 3 shows a graph the dependence of the pneumatic cylinder diameter D (mm) on the load indicator on the rod χ for the specified pressures: $p_{m1}=0.1$ MPa, $p_{m2}=0.5$ MPa and $p_{m3}=1$ MPa. The load on the rod χ is a dimensionless parameter. The indicator χ characterizes the force acting on the rod when a specified air pressure is simultaneously applied to the piston.

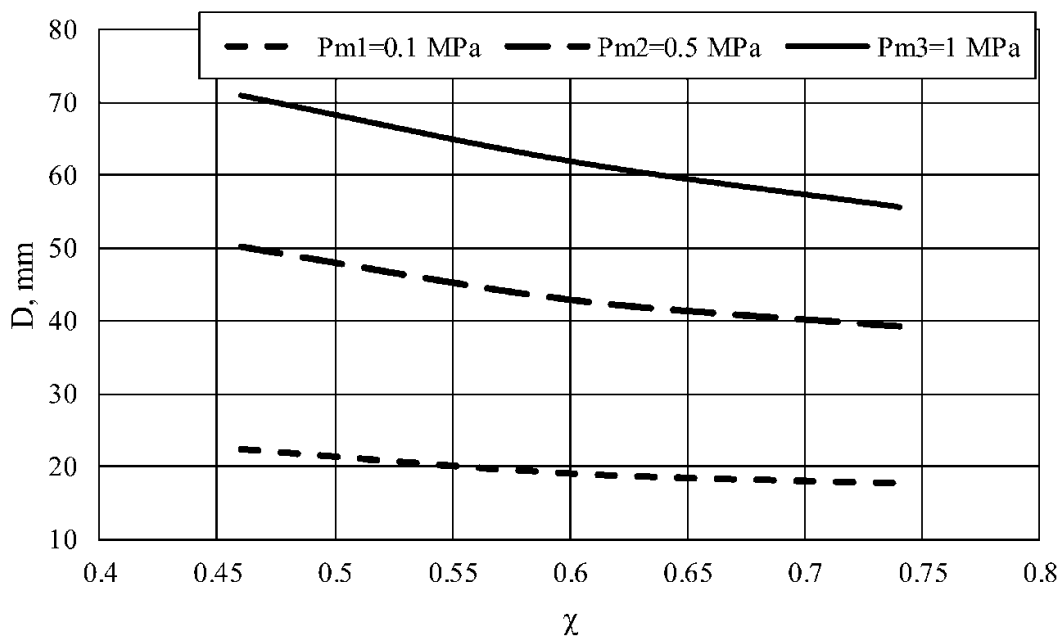


Fig. 3. Dependence of the pneumatic cylinder diameter D (mm) on the rod load indicator χ for the specified pressures: $p_{m1}=0.1$ MPa, $p_{m2}=0.5$ MPa and $p_{m3}=1$ MPa

Source: developed by the authors.

We consider the dependence of the pneumatic cylinder diameter D on the dimensionless rod load indicator for different pressures: $p_{m1}=0.1$ MPa, $p_{m2}=0.5$ MPa and $p_{m3}=1$ MPa. For a pressure of 1 MPa, the diameter D changes from 70.94 mm to 55.75 mm. For a pressure of 0.5

MPa the diameter D changes from 50.16 mm to 39.4 mm, and for pressure of 0.1 MPa the diameter D changes from 22.43 mm to 17.63 mm.

For the graph with a pressure of 0.1 MPa, we observe a difference of 44.7% compared to 0.5 MPa, and for 0.5 MPa, comparing with 1 MPa, the difference is 70.7%. The study shows a sharp change in the determined diameters depending on the pressure that will be supplied to the pneumatic cylinder chamber.

Analyzing the graphs, we note that as the cylinder diameters decrease, the excess load applied to the rod increases, which may lead to the eventual failure of the drive components.

Conclusions. The drive is a critical part of a cardboard blank manufacturing machine, directly impacting the quality of printed products made from cardboard.

The improvement involves using four supporting pneumatic cylinders that simultaneously lower the pressing plate. Synchronization of the pneumatic cylinders occurs by supplying air from a single system to all cylinders.

Preliminary analytical calculations provide an overview of the die-cutting technological process using a pneumatic drive. Key technical parameters include cylinder volumes, compressed air pressure, modeled pneumatic line diameters, and piston dimensions.

For more efficient operation, it is recommended to use cylinders with the lowest operating pressure and larger piston areas to reduce preparation time. The pneumatic drive significantly enhances the die-cutting process through the proposed pressing plate design with perforated slots. This method is more environmentally friendly due to the use of compressed air as the primary working force. The drive's functionality is ensured by the pressing plate's structural features, particularly its extended capabilities through the integration of a pneumatic chamber. This new technical solution enables the creation of an air cushion during cardboard die-cutting, thereby increasing the longevity of cutting tools.

References

1. Nesterenko, V.P. (2013). *Hidravlika, hidro- ta pnevmopryvody [Hydraulics, hydraulic and pneumatic drives]*. NUVHP.
2. Buriennikov, Yu.A., Nemyrovskiy, I.A., Kozlov, L.H. (2013). *Hidravlika, hidro- ta pnevmopryvody [Hydraulics, hydraulic and pneumatic drives]*. VNTU.
3. Rehei, I., Knysh, O., Behen, P., & Mykhailiv, Yu. (2024). Analytical studies of the force load of the pressure plate drive in a barbell press. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical Sciences and Technologies*, 3(37), 37–44. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3\(37\)-37-44](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3(37)-37-44).
4. Khvedchyn, Yu.Y., Zelenyi, V.V. (2014). Analiz mekhanizmiv presa shtantsiuvalnykh avtomativ [Analysis of the mechanisms of the press of the trouser machine]. *Naukovi zapysky – Scientific notes*, 4(49), 21–30. <http://nz.uad.lviv.ua/static/media/4-49/6.pdf>.
5. Rehei, I.I., Vlach, V.V., Knysh, O.B., Mlynko, O.I. (2022). Kompleksnyi analiz funktsionuvannia mekhanizmiv pryvoda natysknoi plyty u shtantsiuvalnykh presakh [Comprehensive analysis of the functioning of the mechanisms of the pressure plate drive in the trouser presses]. *Polihrafiia i vydavnycha sprava – Printing and publishing*, 2(84), 88–98. <http://pvs.uad.lviv.ua/static/media/2-84/10.pdf>.
6. Shakhbazov, Ya.O., Cheterbukh, O.Yu., Shyrokov, V.V., Palamar, O.O. (2020). Mekhanizm pryvodu natysknoi plyty ploskoho shtantsiuvalnoho presa [Mechanism of the drive of the pressure plate of a flat bar press]. *Polihrafiia i vydavnycha sprava – Printing and publishing*, 1(79), 112–120. <http://pvs.uad.lviv.ua/static/media/1-79/12.pdf>.
7. Kuznetsov, V.O., Rehei, I.I., Vlach, V.V. (2017). Modernizatsiia mekhanizmu pryvoda natysknoi plyty u shtantsiuvalnomu presi [Modernisation of the mechanism of the pressure plate drive in the barbell press]. *Polihrafiia i vydavnycha sprava – Printing and publishing*, 1(73), 56–62. <http://pvs.uad.lviv.ua/static/media/1-73/8.pdf>.
8. Cheterbukh O.Yu. (2022). Porivnialna sylova kharakterystyka ploskoshtantsiuvalnoho presa [Comparative power characteristics of a flat-bed press]. *Polihrafiia i vydavnycha sprava – Printing and publishing*, 2(84), 99–108. <http://pvs.uad.lviv.ua/static/media/2-84/11.pdf>.

9. Rehei, I.I., Ternytskyi, S.V., Kandiak, N.M., Vlach, V.V. (2018). Eksperymentalna otsinka vplyvu shvydkisnoho rezhymu na sylovi navantazhennia kombinovanoho mekhanizmu pryvoda natysknoi plyty pry shtantsiuvanni kartonu [Experimental assessment of the influence of the speed regime on the power loads of the combined mechanism of the pressure plate drive during cardboard stamping]. *Polihrafiia i vydavnycha sprava – Printing and publishing*, 1(75), 43-50. <http://pvs.uad.lviv.ua/static/media/1-75/6.pdf>.

10. Ternytskyi, S., Rehei, I., Kandiak, N., Radikhovskiy, I., Mlynko, O. (2021). Experimental research of paperboard cutting in die cutting press with the screw-nut transmission of drive mechanism of a movable pressure plate. *Acta mechanica et automatica*, 15(3), 122–131. <https://doi.org/10.2478/ama-2021-0017>.

11. Ivanko, A., Kolinko, I. (2023). Designing the pressing plate mechanism of the flat die-cutting press. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva – Technology and technique of printing*, 1(79), 77–90. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(79\).2023.54015](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(79).2023.54015).

Список використаних джерел

1. Нестеренко, В. П. (2013). Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: навч. посіб. / В. П. Нестеренко. – Рівне : НУВГП, 2013. – 328 с.

2. Буренніков, Ю. А. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : навч. посіб. / Ю. А. Буренніков, І. А. Немировський, Л. Г. Козлов. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 273 с.

3. Регей, І. Аналітичні дослідження силового навантаження привода натискної плити у штанцювальному пресі / І. Регей, О. Книш, П. Бегень, Ю. Михайлів // Технічні науки та технології. – 2024. – № 3(37). – С. 37-44. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3\(37\)-37-44](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3(37)-37-44).

4. Хведчин, Ю. Й. Аналіз механізмів преса штанцювальних автоматів [Електронний ресурс] / Ю. Й. Хведчин, В. В. Зелений // Наукові записки [Української академії друкарства]. – 2014. – № 4. – С. 21-30. – Режим доступу: <http://nz.uad.lviv.ua/static/media/4-49/6.pdf>.

5. Регей, І. І. Комплексний аналіз функціонування механізмів привода натискної плити у штанцювальних пресах / І. І. Регей, В. В. Влах, О. Б. Книш, О. І. Млинко // Поліграфія і видавнича справа. – 2022. – Вип. 2(84). – С. 88-98. – Режим доступу: <http://pvs.uad.lviv.ua/static/media/2-84/10.pdf>.

6. Механізм приво­ду натискної плити плоского штанцювального преса / Я. О. Шахбазов, О. Ю. Четербух, В. В. Широков, О. О. Паламар // Поліграфія і вид. справа. – 2020. – № 1. – С. 112-120. – Режим доступу: <http://pvs.uad.lviv.ua/static/media/1-79/12.pdf>.

7. Кузнецов, В. О. Модернізація механізму приво­ду натискної плити у штанцювальному пресі / В. О. Кузнецов, І. І. Регей, В. В. Влах // Поліграфія і видавнича справа. – 2017. – № 1. – С. 56-62. – Режим доступу: <http://pvs.uad.lviv.ua/static/media/1-73/8.pdf>.

8. Четербух, О. Ю. Порівняльна силова характеристика плоскоштанцювального преса / О. Ю. Четербух // Поліграфія і видавнича справа. – 2022. – Вип. 2(84). – С. 99-108. – Режим доступу: <http://pvs.uad.lviv.ua/static/media/2-84/11.pdf>.

9. Експериментальна оцінка впливу швидкісного режиму на силові навантаження комбінованого механізму приво­ду натискної плити при штанцюванні картону / І. І. Регей, С. В. Терницький, Н. М. Кандяк, В. В. Влах // Поліграфія і видавнича справа. – 2018. – № 1. – С. 43-50. – Режим доступу: <http://pvs.uad.lviv.ua/static/media/1-75/6.pdf>.

10. Ternytskyi, S. Experimental research of paperboard cutting in die cutting press with the screw-nut transmission of drive mechanism of a movable pressure plate / S. Ternytskyi, I. Rehei, N. Kandiak, I. Radikhovskiy, O. Mlynko // *Acta mechanica et automatica*. – 2021. – Vol. 15, № 3. – Pp. 122-131. DOI: <https://doi.org/10.2478/ama-2021-0017>.

11. Ivanko A. Designing the pressing plate mechanism of the flat die-cutting press / A. Ivanko, I. Kolinko // *Технологія і техніка друкарства*. – 2023. – Вип. 1(79). – С. 77-90. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(79\).2023.54015](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(79).2023.54015).

Отримано 21.12.2024

**Андрій Іванович Іванко¹, Микола Анатолійович Зенкін²,
Максим Леонідович Черниш³, Ілля Олександрович Колінько⁴**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машин і агрегатів поліграфічного виробництва
Національний технічний університет України

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

E-mail: ivanko-a@ukr.net. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-4735-9665>. **ResearcherID:** K-1024-2017

²доктор технічних наук, професор, завідувач 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>. **Scopus Author ID:** 6506189455

³аспірант кафедри машин і агрегатів поліграфічного виробництва

Національний технічний університет України

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

E-mail: maxim073074@gmail.com

⁴магістр кафедри машин і агрегатів поліграфічного виробництва

Національний технічний університет України

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

E-mail: hotarn22@gmail.com

УДОСКОНАЛЕННЯ ПНЕВМАТИЧНОГО ПРИВОДА ПЛОСКОГО ШТАНЦЮВАЛЬНОГО ПРЕСА

Дослідження спрямоване на створення нового ефективного привода для натискної плити штанцювальної машини. Привод є ключовою частиною машини для виготовлення картонних розгортки і безпосередньо впливає на якість поліграфічної продукції виготовленої з картону.

Класичні механізми у приводах натискної плити мають недоліки. Вони громіздкі та споживають багато електроенергії. Тому метою роботи є розробка нового пневматичного привода пристрою та енергоощадного способу для виготовлення картонних розгортки.

Основне завдання полягає у детальному аналізі системи класичних приводів та їх удосконаленні. Удосконалення здійснюється за допомогою чотирьох опорних пневмоциліндрів, що одночасно опускають натискну плиту. Синхронізація пневматичних циліндрів буде відбуватися за рахунок одночасної подачі повітря з однієї системи в усі пневмоциліндри.

Попередні аналітичні розрахунки надають загальну характеристику технологічного процесу висікання з використанням пневматичного привода. Важливими технічними параметрами є об'єми циліндрів, тиск стисненого повітря, змодельовані діаметри пневмоліній та геометричні розміри поршня.

Для більш ефективної експлуатації пристрою рекомендується використовувати циліндри з найменшим робочим тиском і більшою площею поршня для скорочення підготовчого часу. Пневматичний привод може значно покращити технологічний процес висікання за рахунок запропонованої конструкції натискної плити з перфораційними пазами. Спосіб висікання є більш екологічним через використання як основної робочої сили стисненого повітря. Працездатність привода забезпечується завдяки конструкційним особливостям натискної плити, а саме розширеній її функціональності за рахунок введення в її основу пневматичної камери. Нове технічне рішення дозволяє створити аналог повітряної подушки при висіканні картону і тим самим збільшити довговічність різальних інструментів.

Механіка технологічного процесу висікання картонних розгортки з використанням пневматичного привода пропонується вперше і потребує подальших наукових досліджень. Однак додаткове використання стисненого повітря у запропонованій технології для розділення картону буде позитивно відображатися на якості майбутньої поліграфічної і пакувальної продукції.

Ключові слова: картонна розгортка; натискна плита; штанцювальний прес; пневмоциліндр; стиснене повітря; пневматична камера; реверсивний рух; поршень; шток.

Рис.: 3. Бібл.: 11.

**Володимир Олександрович Кравець¹, Олександр Михайлович Кравець²,
Сергій Вікторович Лапковський³, Володимир Костянтинович Фролов⁴,
Сергій Петрович Сапон⁵, Василь Петрович Приходько⁶**

¹інженер кафедри конструювання машин

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

E-mail: bond118@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-6867-4858> **ResearcherID:** [ITU-8413-2023](https://orcid.org/0009-0005-6867-4858)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

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

E-mail: om.kravets@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956> **ResearcherID:** [IUQ-7186-2023](https://orcid.org/0000-0002-7468-0956)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

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

E-mail: Lapkovsky@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231> **ResearcherID:** [HCH-3837-2022](https://orcid.org/0000-0002-9870-9231)

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

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

E-mail: v.k.frolov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X> **ResearcherID:** [ACH-0071-2022](https://orcid.org/0000-0002-3697-286X)

⁵кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

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

E-mail: s.sapon@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431> **ResearcherID:** [IZE-2184-2023](https://orcid.org/0000-0003-1082-6431)

⁶кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

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

E-mail: privas0718@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1852-3777> **ResearcherID:** [HDM-7277-2022](https://orcid.org/0000-0003-1852-3777)

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ АНАЛОГІЙ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ АДАПТИВНИХ ЗАХВАТНИХ ПРИСТРОЇВ

Стаття присвячена застосуванню методу аналогій при проєктуванні адаптивних захватних пристроїв промислових роботів. Як аналоги використано конструкції та принцип дії лещат із різною конфігурацією та конструктивним виконанням затискних губок для адаптації до геометрії поверхонь об'єкта, який необхідно затиснути. Запропонована методика проєктування дозволяє в систематизованому вигляді охоплювати не тільки вже наявні на виробництві конструкції адаптивних захватних пристроїв, але і знайти такі, створення яких можливе, а в багатьох випадках навіть доцільне. Наведено оригінальні конструкції адаптивних захватних пристроїв, розроблені авторами.

Ключові слова: захватний пристрій; адаптивний; промисловий робот; конструкція; проєктування; метод аналогій; лещата; фрактальні; захоплення; губки.

Рис.: 10. Бібл.: 34.

Актуальність теми дослідження. Поняття «адаптація» (від латинського *adapto* – пристосовую) спочатку розглядалося як медичне або біологічне. Однак науково-технічний прогрес, стрімкий розвиток різноманітних технологій та технічних систем привернули увагу до адаптації фахівців різних галузей: інженерів і психологів, соціологів і педагогів. Поняття «адаптація» зараз цілком можна вважати як загальнонаукове, що сприяє синтезу знань, які відносяться до різних наукових об'єктів, та використовується представниками багатьох наук. Так, з появою такої науки, як кібернетика, у якій як механізм адаптації розглядався від'ємний зворотний зв'язок, набули широкого поширення такі поняття, як «адаптивне керування», «адаптивна система», «адаптивний фільтр» тощо.

Поняття «адаптація» не оминуло і такої галузі, як робототехніка. Наразі доволі часто вживаються такі поняття, як «робот з адаптивним керуванням», «адаптивний робот», «адаптивний захватний пристрій» (АЗП) тощо.

За даними звіту IFR – Міжнародної федерації робототехніки – за останні роки маніпулювання (Handling) об'єктами є найбільш роботизованою операцією серед сфер застосування промислових роботів (рис. 1) [1-3].

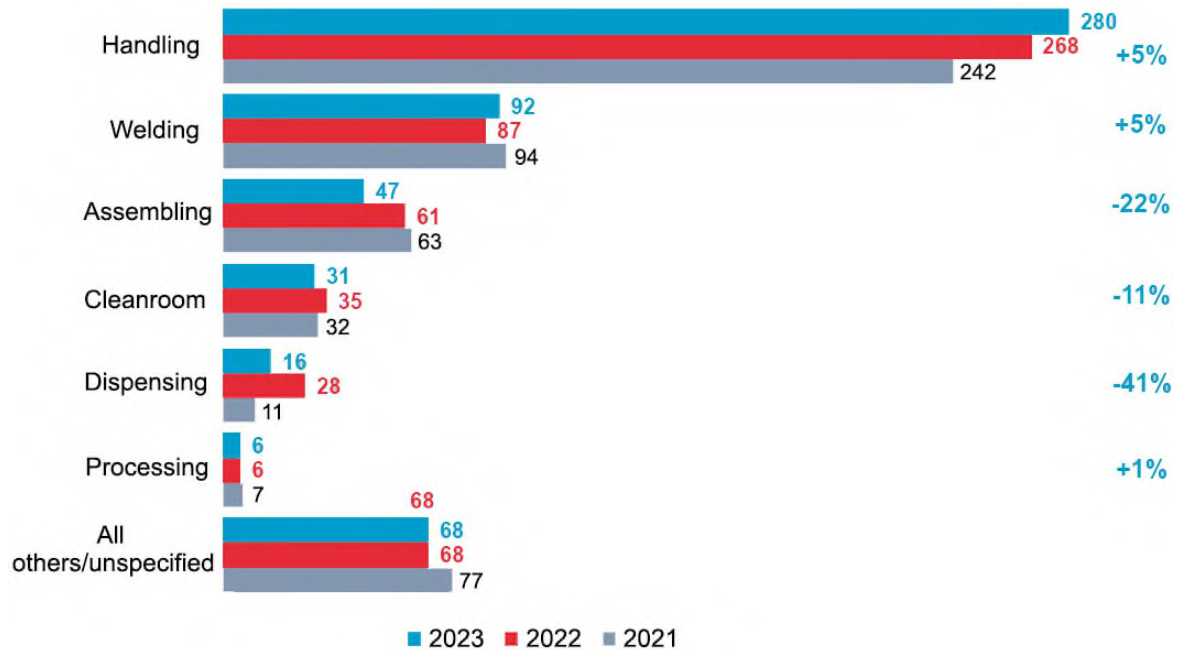


Рис. 1. Річна кількість інсталяцій промислових роботів за сферами застосування [1]

На рис. 2 наведено систематизовані статистичні дані за 2020-2023 роки щодо кількості інсталяцій промислових роботів (ПР) у галузі механічної інженерії, зокрема при маніпулюванні, складанні, зварюванні предметів виробництва.

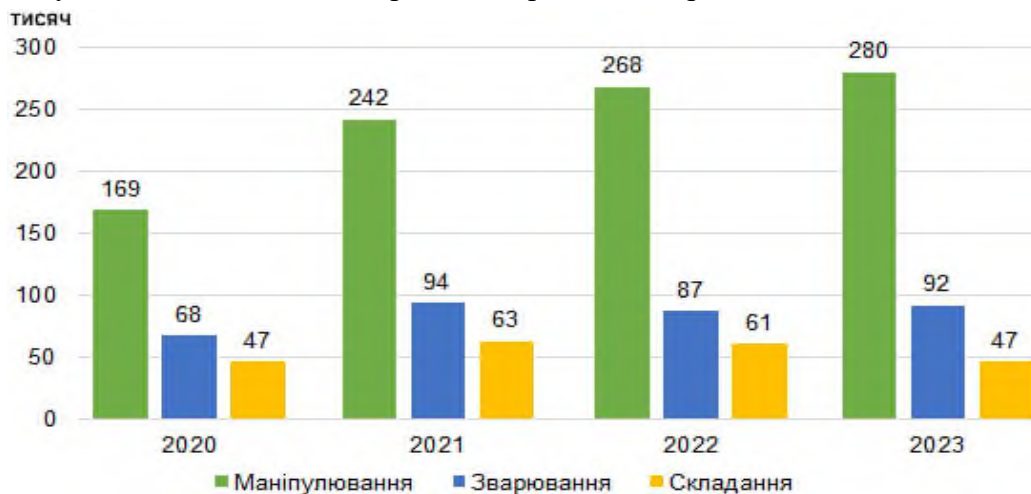


Рис. 2. Статистичні дані по кількості інсталяцій промислових роботів у галузі механічної інженерії

Джерело: розроблено авторами.

Слід зауважити, що в порівнянні з 2021 роком, протягом 2022-2023 років кількість інсталяцій промислових роботів у зварюванні та складанні мала тенденцію до зниження, тоді як у маніпулюванні вона зростала. Порівняно з 2020 роком зростання становить 65 % (рис. 2) [1-3].

Зрозуміло, що роботизоване маніпулювання об'єктами виробництва можливе тільки тоді, коли промисловий робот оснащений захватним пристроєм (ЗП). Таким чином, розвиток теорії проектування конструкцій АЗП є досить актуальним.

Постановка проблеми. Останні технологічні досягнення дозволяють ПР, які оснащені ЗП, виконувати дуже багато завдань, що традиційно були притаманні руці людини, дозволяючи використовувати ЗП у широкому діапазоні захвату та утримання

об'єктів виробництва (ОВ). Залежно від застосування, ідеальна конструкція ЗП повинна бути адаптована до багатьох видів ОВ. Однак, попри різноманіття ЗП, які зараз доступні на ринку, є багато завдань, які важко або навіть неможливо виконати наявними ЗП. Тому є попит на нові конструкції АЗП, які здатні конкурувати з людською рукою. Не викликає сумніву, що проблема створення нових конструкцій АЗП існує і, як уже було зазначено, є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У результаті аналізу інформаційних джерел складається таке враження, що нині створення нових АЗП набуло статус повністю самостійної задачі синтезу конструкцій, яка вирішується на базі використання та створення принципово нових програмних і технічних засобів. Саме з цієї причини в останні роки питанням створення принципово нових конструкцій ЗП було присвячено досить багато публікацій та наукових досліджень як українських, так і закордонних авторів [4-9]. За цією темою доволі цікавих публікацій вітчизняних авторів, на жаль, не так вже і багато. До таких робіт вітчизняних учених насамперед слід віднести такі наукові праці, як [4-8]. Але треба відзначити, що в роботах [4; 6; 7] стосовно ЗП наведена практично однакова, інколи застаріла інформація, а інформація щодо створення АЗП практично відсутня. Найбільш ґрунтовними та цінними роботами, на нашу думку, слід вважати роботи [5; 8].

З дослідженнями та публікаціями закордонних авторів зовсім інша ситуація: питанню проектування та дослідження АЗП присвячено дуже багато праць. Так, тільки у роботі [9] науковців з Університету Вісконсин-Мілуокі (США) під назвою „Current Designs of Robotic Arm Grippers: A Comprehensive Systematic Review” у списку використаної літератури наведено 98 посилань з досліджуваного питання, 76 з яких (78 %) були опубліковані за останні 10 років.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Цілком очевидно, що наразі методологія проектування нових конструкцій АЗП повинна вийти за рамки вирішення суто конструкторських задач проектування ЗП. Вона повинна включати глибоке та всебічне дослідження можливості адаптації конструкції ЗП до різних можливих ситуацій і сфер застосування. Аналіз останніх публікацій, які були присвячені конструкціям АЗП, дозволяють дійти до висновку, що проблема обґрунтованого вирішення задачі проектування нових конструкцій АЗП вирішена лише частково.

Метою статті є представлення можливостей застосування методу аналогій при вдосконаленні методики проектування нових конструкцій адаптивних захватних пристроїв для об'єктів зі складною формою захоплюваних поверхонь.

Виклад основного матеріалу. Метод аналогій є одним із найуніверсальніших і водночас простих евристичних прийомів пошуку нових ідей та оригінальних рішень творчих задач. Вперше аналогію як ефективний засіб творчого вирішення задач у 1952 році почав використовувати американський психолог Вільям Джеймс Гордон [10-14]. Аналогію він поклав в основу свого методу, який назвав «Синектика» [12]. Гордон виділяв чотири види аналогій: пряму, особисту (суб'єктивну), символічну та фантастичну. Основні гіпотези та ідеї синектики народилися під час досліджень винахідницької та художньої творчості, які Гордон проводив ще з 1944 року. Основні ж принципи та правила синектики були розроблені Вільямом Джейсоном Гордоном і його колегою Джорджем Мезером Прінсем у період між 1950 і 1960 роками, коли вони разом працювали в консалтинговій компанії Invention Design Group в Arthur D. Little (ADL). У 1961 році Гордон і Прінс створили нову компанію під назвою Syntecticsworld (Syntectics Inc.), яка займалася дослідженнями винахідницької творчості та творчими тренінгами. Ефективність використання методу синектики підтверджує той факт, що клієнтами їх консалтингової компанії були такі всесвітньовідомі корпорації, як General Electric, IBM, Remington Arms, Singer Corporation та багато інших.

Як самостійний метод аналогій був описаний мальтійським і британським психологом та винахідником Едвардом де Боно у роботі [15]. Даний метод є реалізацією прямої аналогії Гордона. Пряма аналогія розуміється, як пошук проєктних рішень, що заснований на порівнянні об'єкта, який необхідно вдосконалити, з об'єктами, подібними за змістом, формою, функціями в інших областях. Вона передбачає розгляд творчих методів, що застосовуються в інших сферах діяльності при вирішенні аналогічних завдань.

На рис. 3 наведена схема порівняння функцій лещат і ЗП промислових роботів.

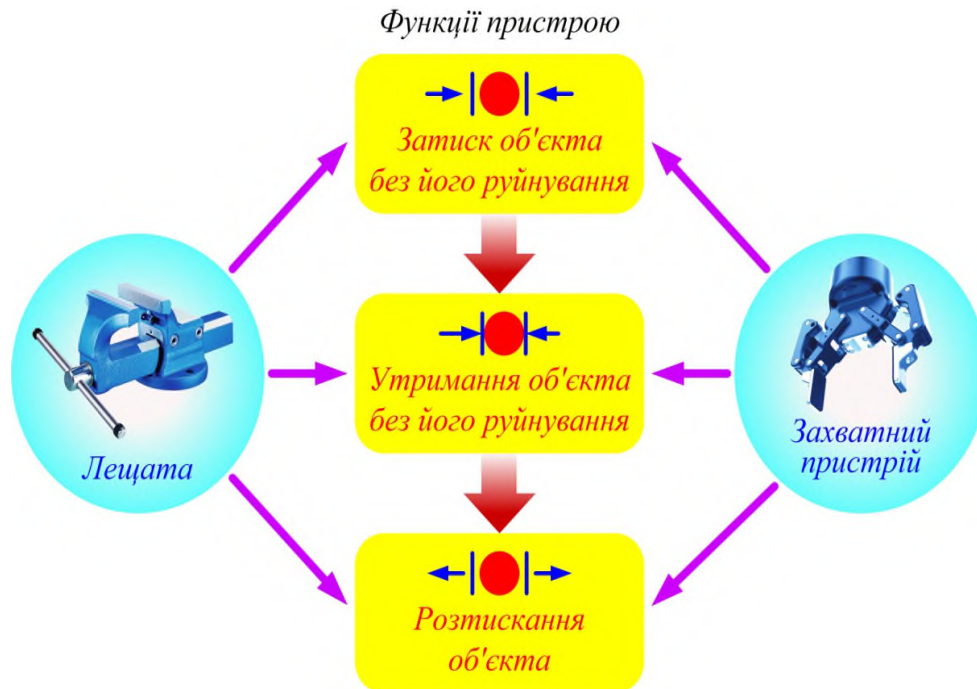


Рис. 3. Схема порівняння функцій лещат і ЗП промислових роботів

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз цієї схеми надає можливість зробити висновок, що функції лещат абсолютно ідентичні функціям ЗП промислових роботів. Це означає, що при проєктуванні нових конструкцій АЗП можна використовувати аналогічні проєктні рішення, що були знайдені при проєктуванні елементів конструкцій лещат.

Зрозуміло, що лещата як механізм набагато старіші, ніж ЗП промислових роботів. Дата їх виникнення достеменно не відома. Спочатку затиск заготовок у лещатах здійснювався за допомогою клина та молотка. Головним недоліком такого затиску було те, що рухомі губки лещат можна було направляти лише радіально. Наступним кроком у розвитку цього пристрою в середньовіччі стала заміна принципу затиску за допомогою різьби.

Так, одна з перших ілюстрацій таких лещат наведена на дерев'яній гравюрі Айзенхютса 1471 року, яка дотепер зберігається у Герцогській бібліотеці міста Гота (Німеччина) [16].

Ще одна з найперших згадок про подібні лещата наведена в Кодексі Льюффельхольця 1505 року – домашній книзі нюрнберзького патриція та лицаря Мартіна Льюффельхольця фон Кольберга – рукописі, що містить опис та ілюстрації унікальних інструментів і обладнання для ремонту, ведення війни та полювання [17]. Подвійні гвинтові лещата також з'являються в книгах для деревообробників кінця XVII століття Фелібієна (1667 рік), Моксона (1678 рік) та Рендла Холма (1688 рік) [16].

Але є ще одне середньовічне зображення, на якому наведений пристрій, який дуже схожий на великі подвійні гвинтові лещата, або суміш одnogвинтових лещат з паралельною напрямною – цей італійський малюнок датується приблизно 1300 роком

[16]. І лише через кілька століть, а саме у 1750 році, з'явилися нові паралельні лещата, у яких рухомі губки рухаються поступально завдяки спеціальним напрямним горизонтальним пазам [18-20] – це стало ключовим етапом еволюції лещат.

Треба зазначити, що в ті часи всі лещата виготовлялися з дерева, і тільки в 1830 році в Англії були виготовлені перші чавунні лещата [18-20].

Аналіз вищенаведеної еволюції конструкцій лещат однозначно вказує на те, що вона була спрямована передусім на покращення конструкції останніх і жодної спроби адаптації конструкції лещат щодо об'єктів, які затискаються по криволінійним поверхням, на той час не здійснювалось. Підтвердженням цьому є той факт, що на всіх схемах і креслениках лещат того часу останні були наведені тільки з плоскими губками, тобто всі вони були призначені лише для затиску деталей виключно по плоским поверхням. Пізніше почали з'являтися лещата з універсальними губками, що надало можливість затискати деталі по циліндричним поверхням (патент Бенджаміна Ф.Стівенса, 1880 рік) (рис. 4) [21].

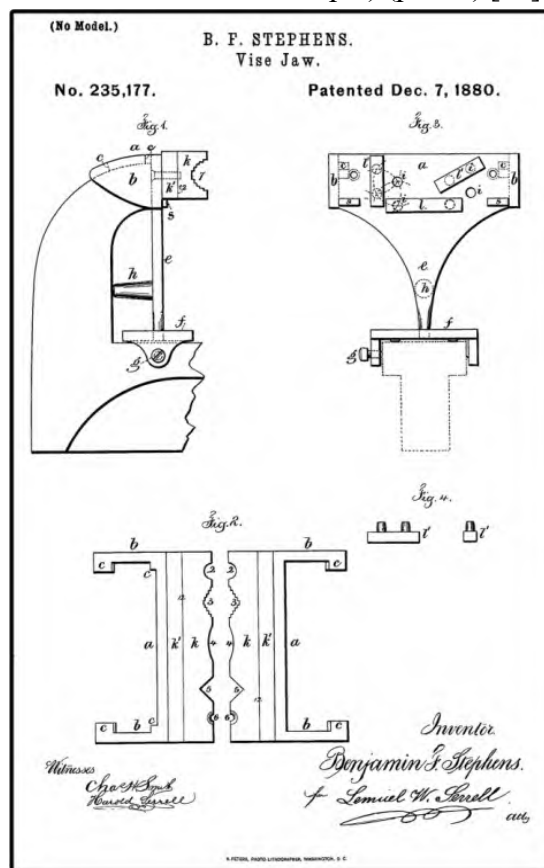


Рис. 4. Ілюстрація патенту Бенджаміна Ф. Стівенса (US Patent: 235,177) [21]

На початку минулого століття багатовікова проблема механічного затиску деталей по будь-яким поверхням, зокрема й по криволінійним, нарешті була вирішена завдяки винаходам австрійського інженера Пауліна Карла Кюнце. Ця проблема вирішувалася завдяки вбудованим у лещата тридцяти поворотним сегментним губкам.

Спочатку Паулін Карл Кюнце винайшов «Реактивні губки для щільного затискання предметів будь-якої форми». На цей винахід Кюнце отримав патент Австрії 10 лютого 1913 року [22].

Свій наступний винахід Паулін Карл Кюнце назвав «Пристрій для встановлення тісного контакту з зачепленням або затисканням тіл будь-якої форми». 17 березня 1913 року Кюнце отримав на цей винахід патент Великої Британії [23] та 22 квітня 1913 року – патент США (рис. 5) [24; 25].

На свій останній винахід – «Багатокомпонентна губка для щільного контакту з тілами будь-якої форми, який відбувається при вирівнюванні тиску» Паулін Карл Кюнц отримав патент Швейцарії 16 жовтня 1922 року [26].

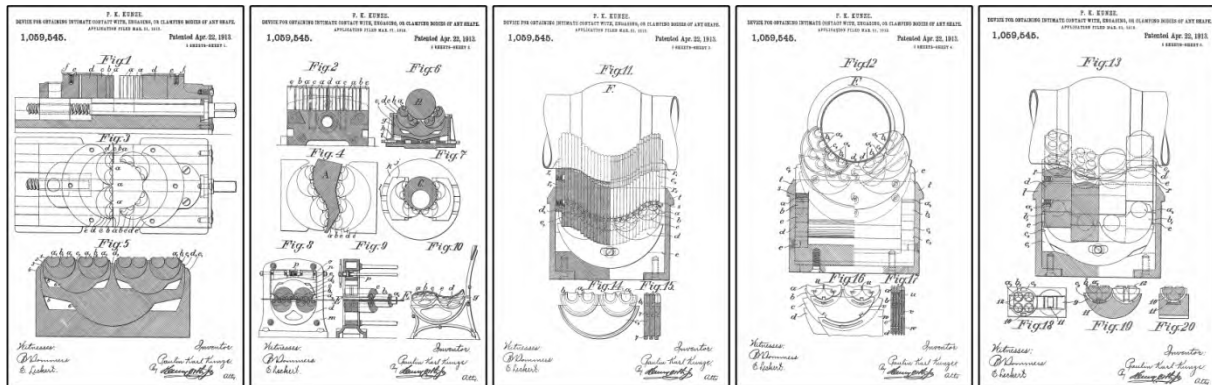


Рис. 5. Ілюстрації патенту Пауліна Карла Кюнц (US Patent: 1,059,545) [24; 25]

Механічні лещата, які були виготовлені на основі цього патенту (рис. 6), у травні 1923 року були прорекламовані американською фірмою Mantle & Co. з Нью-Йорка на обкладинці популярного в той час у промислових кругах професійного журналу про машинобудування American Machinist [27]. У цій рекламі вони були представлені як „Mantle Vise” – «Лещата-мантія».

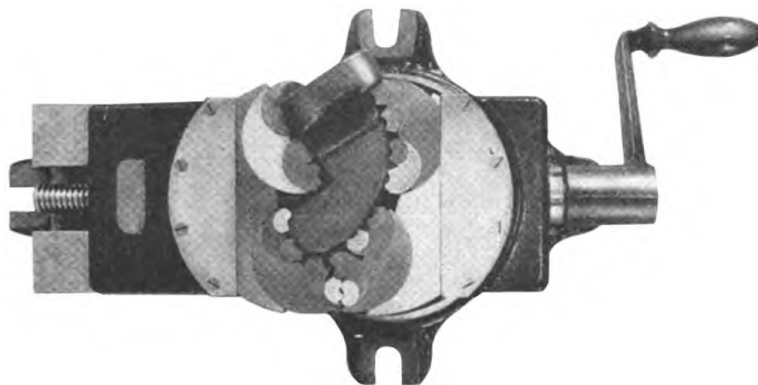


Рис. 6. Механічні лещата, які були виготовлені американською фірмою Mantle & Co на основі патенту Пауліна Карла Кюнц (US Patent: 1,059,545) [24; 25]

У 1928 році Mantle & Co продала всі права на лещата, технологію їх виготовлення, пристосування тощо компанії United States Automatic Box Machinery Co. з Бостона, яка розпочала виробництво та їх продаж як „BOSTON Universal” – «лещата з губками, що самовирівнюються, надійно утримують круглі, квадратні та нестандартні деталі» [28].

Подальший аналіз інформаційних джерел вказує на те, що після цієї події хоча б якісь відомості про подібні лещата були відсутні майже сто років, і тільки з 2020-х років у мережі "Інтернет" вони почали з'являтися знову [29-32].

Слід зауважити, що нині ці лещата позиціонуються як «фрактальні» [29-32] – від латинського слова «fractus», що перекладається як «подрібнений», «дробовий». Само поняття «фрактал» було введено французько-американським математиком Бенуа Мендельбротом у 1975 році [33] – пізніше на 62 роки за винахід Пауліна Карла Кюнц, але, не зважаючи на це, зараз всі лещата, які можуть затискати деталі за криволінійними поверхнями, називаються фрактальними лещатами.

Одним із прототипів фракталів є множина Кантора (дисконтинуум Кантора, пил Кантора) [34] – поняття, яке ввів засновник теорії множин, німецький математик Георг

Фердинанд Людвіг Філіпп Кантор ще у 1883 році. Ця множина дорівнює своїм двом копіям, якщо кожен з копій зменшити втричі та перенести, тобто вона є самоподібною [33]. Множина Кантора являє собою підмножину відрізка дійсних чисел на інтервалі $[0,1]$. Побудувати цю множину можна таким чином: спочатку вилючають середню третину інтервалу $[0, 1]$, залишаючи відрізки $[0, 1/3]$ і $[2/3, 1]$. Далі на кожному наступному кроці побудови вилючають середню третину-інтервал кожного з відрізків, які були отримані на попередньому кроці.

Необхідно зауважити, що фрагмент геометричної інтерпретації множини Кантора за своєю структурою нагадує кінематичну структуру пристрою Пауліна Карла Кюнце «Реактивні губки для щільного затискання предметів будь-якої форми» (рис. 7-8) [34; 22].



Рис. 7. Фрагмент геометричної інтерпретації множини Кантора, шоста ітерація [34]

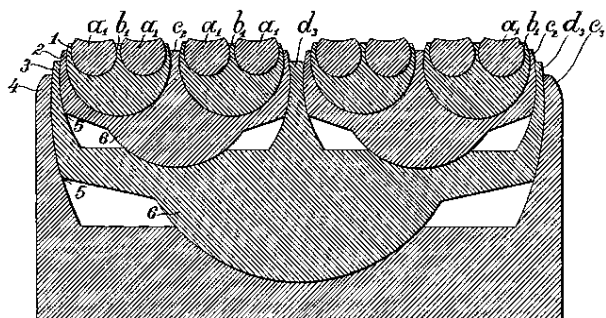


Рис. 8. Ілюстрація з патенту на винахід Пауліна Карла Кюнце (AT Patent: AT-57,512) [22]

Проаналізувавши переваги фрактальних лещат, розроблено декілька нових конструкцій АЗП промислових роботів або маніпуляторів (рис. 9).

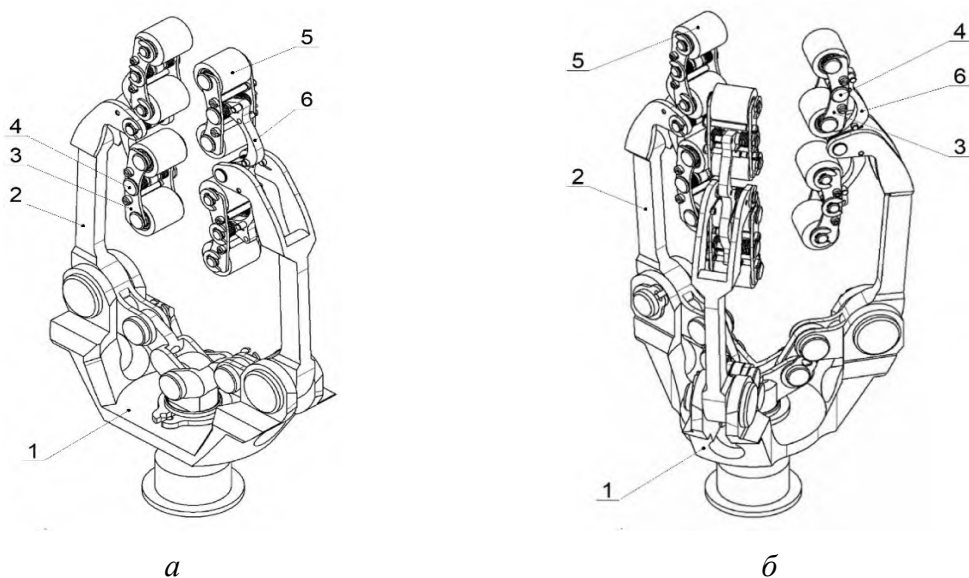


Рис. 9. Конструкції АЗП:

а – двохпальцевий АЗП, *б* – трипальцевий АЗП:

1 – корпус; 2 – пальці; 3 – вторинна рухома фаланга; 4 – шарнір;

5 – контактні елементи; 6 – первинна рухома фаланга

Джерело: розроблено авторами.

У запропонованих конструкціях пальців АЗП використовується принцип, закладений у множині Кантора другої ітерації з можливістю збільшення ітерацій.

На кожному з пальців АЗП розташована одна первинна рухома фаланга 6, виконана у вигляді двоплечого важеля-коромисла з однаковими плечима та шарнірно з'єднана з пальцем 2 у своїй середній частині, при цьому первинна рухома фаланга 6 врівноважено підпружинена відносно пальця 2 при повороті в протилежних напрямках.

На обох кінцях кожної первинної рухоми фаланги 5 закріплені вторинні рухомі фаланги 3 меншої довжини, ніж довжина первинної рухоми фаланги 6, які розміщені так, що їхні ближні до середньої частини первинної рухоми фаланги 6 кінці не торкаються один одного. Вторинні рухомі фаланги 3 також виконані у вигляді двоплечих важелів-коромисел з однаковими плечима й кожна з них шарнірно з'єднана з відповідною первинною рухомою фалангою 6 у середній своїй частині за допомогою шарніра 4. При цьому кожна вторинна рухома фаланга 3 врівноважено підпружинена відносно первинної рухоми фаланги 6 при повороті в обох напрямках, а її кінці виконані з можливістю під'єднання до кожного з них третинної рухоми фаланги.

На обох кінцях кожної рухоми фаланги, що прикріплена останньою в ланцюгу фаланг (на рис. 9 останньою в ланцюгу фаланг зображена вторинна рухома фаланга 3), розташовані контактні елементи 5, що можуть обертатися навколо своєї осі за рахунок базування, наприклад, на підшипнику кочення.

Залежно від функціонального призначення АЗП та конструктивних характеристик захоплюваних поверхонь контактні елементи 5 можуть бути змінними, відрізнятися формою та конфігурацією робочої поверхні. На рис. 9 контактні елементи 5 наведені у вигляді циліндричного ролика з гладкою робочою поверхнею.

Циліндричні контактні елементи є найбільш універсальними й мають достатньо функціональних можливостей для захвату об'єктів різноманітної конструктивної складності та широкого діапазону розмірів. Проте при постійній роботі з об'єктами однакової форми і типорозміру можуть використовуватись спеціальні контактні елементи (рис. 10), форма та конфігурація робочої поверхні яких відповідає формі та типорозміру об'єктів, які потрібно захватити.

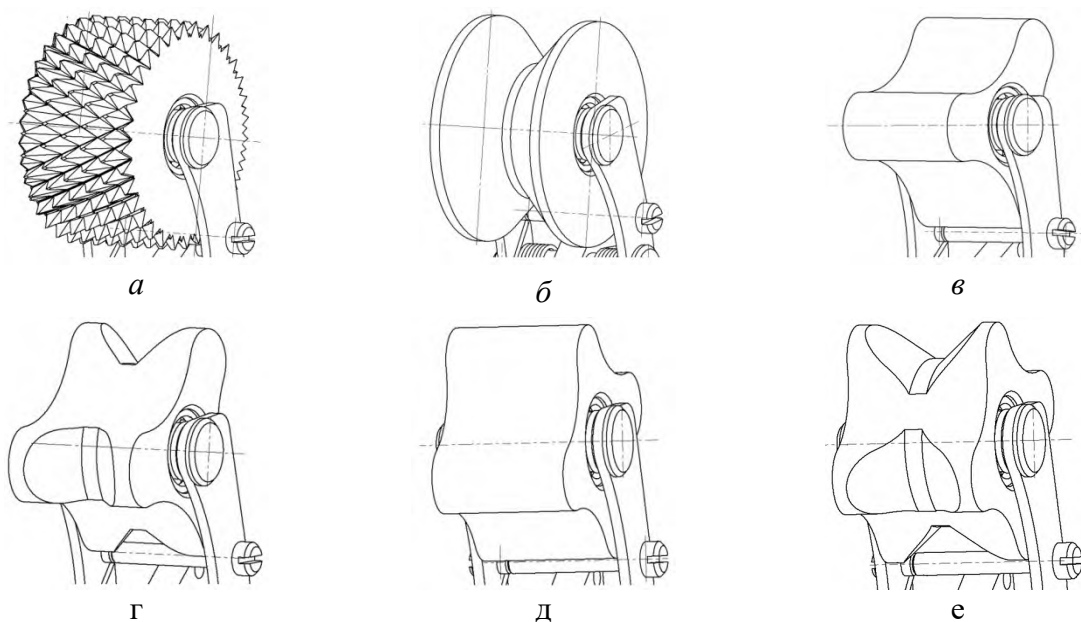


Рис. 10. Варіанти конструкцій контактних елементів АЗП:

a – циліндричний з насічкою, *б* – циліндричний з канавкою, *в* – трикутний,
г – трикутний з канавкою, *д* – чотирикутний, *е* – чотирикутний із канавкою

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 10, *в-е* наведені приклади конфігурації контактних елементів, які збільшують порядок ітерації множини Кантора в запропонованих АЗП до третього.

Висновки. За результатами аналізу особливостей принципу функціонування фрактальних лещат та переваг останніх щодо універсальності захвату деталей з криволінійними поверхнями продемонстровано можливості застосування методу аналогій при проєктуванні нових конструкцій адаптивних захватних пристроїв. Розроблено схемні рішення нових конструкцій АЗП промислових роботів або маніпуляторів для маніпулювання об'єктами зі складною формою захоплюваних поверхонь. Застосування методу аналогій дозволяє розширити можливості проєктування цілої гами нових оригінальних АЗП з адаптацією їхньої конструкції до різних сфер застосування.

Список використаних джерел

1. Welcome to the presentation of World Robotics 2024. [Access mode]. – Access mode: https://ifr.org/img/worldrobotics/Press_Conference_2024.pdf
2. Аналіз розмірних зв'язків роботизованого комплексу / В. Кравець, О. Кравець, Ю. Адаменко, С. Лапковський, В. Кореньков, В. Фролов // Технічні науки та технології. – 2023. – №3(33). – С. 40-52. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3\(33\)-40-52](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3(33)-40-52).
3. Аналіз розмірних зв'язків роботизованої складальної системи. / В. Кравець, О. Кравець, С. Лапковський, В. Фролов, М. Гладський, В. Приходько // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2024. – № 1(88). – С. 54-62. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.7>.
4. Ковальов, Ю. А. Проєктування промислових роботів та маніпуляторів: навчальний посібник / Ю. А. Ковальов, С. О. Кошель, О. П. Манойленко. – Київ : Центр учбової літератури, 2022. – 256 с.
5. Павленко, І. І. Захватні пристрої роботів : монографія / І. І. Павленко, М. О. Годунко ; [за ред. І. І. Павленка]. – Кропивницький : ТОВ «КОД», 2020. – 386 с.
6. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні: підручник / Л. Є. Пелевін, К. І. Почка, О. М. Гаркавенко, Д. О. Міщук, І. В. Русан, – Київ : ТОВ «НВП «Інтерсервіс». – 258 с.
7. Поліщук, М. М. Робототехнічні системи: проєктування і моделювання: навч. посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» / М. М. Поліщук, М. М. Ткач. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 112 с.
8. Проць, Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів : навч. посібн. / Я. І. Проць. – Тернопіль : Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. – 232 с.
9. Current Designs of Robotic Arm Grippers: A Comprehensive Systematic Review / J. Hernandez, M. S. H. Sunny, J. Sanjuan, I. Rulik, M. I. I. Zarif, S. I. Ahamed, H. U. Ahmed, M. H. Rahman // Robotics. – 2023. – № 12(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics12010005>.
10. Основи творення машин: підручник / М. Я. Бучинський, О. В. Горик, А. М. Чернявський, С. В. Яхін. – Харків : НТМТ, 2017. – 448 с.
11. Основи творення машин: підручник / М. Я. Бучинський [та ін.]; за ред. О. В. Горика, д-ра техн. наук, проф., заслуж. працівника нар. освіти України. – Київ: Ліра-К, 2020. – 447 с.
12. Gordon, W.J.J. Synectics: the development of creative capacity / W. J. J. Gordon. – New York, Harper, 1961. – 196 p.
13. Prince, G. M. The practice of creativity / G. M. Prince. – Collier Books, 1970. – 197 p.
14. Roukes, N. Design Synectics: Stimulating Creativity in Design / Nicholas Roukes. – Davis Publications, 1988. – 224 p.
15. De Bono, E. Lateral Thinking: Creativity Step by Step / Edward De Bono. – Harper & Row, 1970. – 300 p.
16. Double screw vise. (2015, November 30) [Electronic resource]. – Access mode: <https://thomasguild.blogspot.com/2015/11/double-screw-vise.html>.

17. Löffelholz Kodex. (2020, November 17) [Electronic resource]. – Access mode: <https://machinethinking.co/2020/11/17/loffelholz-kodex/>.
18. The History of Machine Vice. (2023, March 14) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.her-bert.com/en-US/newsc25-the-history-of-machine-vice>.
19. A brief history of the vice [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.wonkeedonkeetools.co.uk/vices/a-brief-history-of-the-vice>.
20. History - Bench Vice [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.heuer.de/en/company/history-bench-vice#:~:text=It%20was%20only%20with%20the,transformed%20into%20any%20shape%20easily>.
21. Benjamin F. Stephens. Vise-jaws (US Patent: 235,177) / Benjamin F. Stephens. – Published on 1880.
22. Kunze, P. K. Reaction jaws for intimately clamping any shaped article (AT Patent: AT-57,512) / Paulin Karl Kunze. – Published on 1913.
23. Kunze, P. K. Device for obtaining intimate contact with, engaging, or clamping bodies of any shape (GB Patent: GB-191,206,479) / Paulin Karl Kunze. – Published on 1913.
24. Kunze, P. K. Device for obtaining intimate contact with, engaging, or clamping bodies of any shape: US Patent: 1,059,545 / Paulin Karl Kunze. – Published on 1913.
25. Device for obtaining intimate contact with, engaging, or clamping bodies of any shape. [Electronic resource]. – Access mode: <https://patents.google.com/patent/US1059545A/en>.
26. Kunze, P. K. Multi-part jaw for snug contact with bodies of any shape, taking place under pressure equalization : patent CH-96,512 / P. K. Kunze. – Published on 16.10.1922.
27. P. K. Kunze's Contribution to The World – A Vise with Oscillatable Cheeks [Electronic resource] // Tacky Raccoons. – Mode of access: <https://tackyraccoons.com/2021/11/08/p-k-kunzes-contribution-to-the-world-a-vise-with-oscillatable-cheeks/>.
28. Mantle & Co. (2023, March 14) [Electronic resource]. – Access mode: <http://vintagemachinery.org/mfgindex/detail.aspx?id=12319>.
29. Кузнецов, Ю. М. Передумови використання системно-морфологічного підходу та теорії фракталів при створенні лещат для об'єктів складної форми / Ю. М. Кузнецов, Г. Сінмін, О. В. Самойленко // Наукові вісті КНУ. – 2021. – № 4(134). – С. 52–57. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.4.261849>.
30. Фрактальні лещата які не бачили навіть досвідчені майстри [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://nevsedoma.com.ua/uk/492541-fraktalni-leshchata-iaki-ne-bachylyu-navit-dosvidcheni-maistry.html>.
31. Getting to Grips With the Fractal Vise. [Electronic resource]. – Access mode: https://www.metmo.co.uk/blogs/news/getting-to-grips-with-the-fractal-vise?srsId=AfmBOoop9VkB1OKSsavj2bTjDj_1Oqs9Vsedf2hkFQYFquEyAx6zwSV.
32. Fractal Vise by TeachingTech [Electronic resource] // Thingiverse. – Mode of access: https://www.thingiverse.com/thing:4904044#google_vignette.
33. Mandelbrot, B. B. Les objets fractals: forme, hasard et dimension / Benoit B. Mandelbrot. – Flammarion, Paris, 1975. – 190 p.
34. Ferreiros, Jose. Labyrinth of thought: a history of set theory and its role in modern mathematics / Ferreiros Domínguez Jose. – Basel; Boston, MA.: BirkhäuserVerlag, 1999. – 440 p.

References

1. *Welcome to the presentation of World Robotics 2023*. (dateless). ifr.org. https://ifr.org/img/worldrobotics/2023_WR_extended_version.pdf.
2. Kravets, V., Kravets, O., Adamenko, Yu., Lapkovskiy, S., Korenkov, V., & Frolov, V. (2023). Analiz rozmirnykh zviazkiv robotyzovanoho kompleksu [Analysis of dimensional relationships of a robotic complex]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, 3(33), 40–52. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3\(33\)-40-52](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3(33)-40-52).
3. Kravets, V., Kravets, O., Lapkovskiy, S., Frolov, V., Hladskiy, M., & Prykhodko, V. (2024). Analiz rozmirnykh zviazkiv robotyzovanoi skladalnoi systemy [Analysis of dimensional relationships of a robotic assembly system]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of the Kherson National Technical University*, 1(88), 54–62. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.7>.

4. Kovalov, Yu.A., Koshel, S.O., & Manoilenko, O.P. (2020). *Proektuvannia promyslovykh robotiv ta manipulatoriv [Design of industrial robots and manipulators]*. Tsentr uchbovoi literatury.
5. Pavlenko, I.I., & Hodunko, M.O. (2020). *Zakhvatni prystroi robotiv [Robotic gripping devices]*. TOV «KOD».
6. Pelevin, L.Ie., Pochka, K.I., Harkavenko, O.M., Mishchuk, D.O., & Rusan, I.V. (2016). *Syntezy robototekhnichnykh system v mashynobuduvanni [Synthesis of robotic systems in mechanical engineering]*. TOV «NVP «Interservis».
7. Polishchuk, M.M., & Tkach, M.M. (2021). *Robototekhnichni systemy: proektuvannia i modeliuwannia [Robotic systems: design and modeling: a textbook for students of specialty 126 "Information systems and technologies"]*. KPI im. Ihoria Sikorskoho.
8. Prots, Ya.I. (2008). *Zakhopliuvalni prystroi promyslovykh robotiv [Grasping devices of industrial robots]*. Ternopil'skyi derzhavnyi tekhnichnyi universytet im. I. Puliuia.
9. Hernandez, J., Sunny, M.S.H., Sanjuan, J., Rulik, I., Zarif, M.I.I., Ahamed, S.I., Ahmed, H.U., & Rahman, M.H. Current Designs of Robotic Arm Grippers: A Comprehensive Systematic Review. *Robotics 2023*, 12 (1). <https://doi.org/10.3390/robotics12010005>.
10. Buchynskiy, M.Ia., Horyk, O.V., Cherniavskiy, A.M., & Yakhin, S.V. (2017). *Osnovy tvorennia mashyn [Fundamentals of machine creation]*. NTMT.
11. Buchynskiy, M.Ia., Horyk, O.V., Cherniavskiy, A.M., & Yakhin, S.V. (2020). *Osnovy tvorennia mashyn [Fundamentals of machine creation]*. Lira-K.
12. Gordon, W.J.J. (1961). *Synectics: the development of creative capacity*. Harper & Row.
13. Prince, G.M. (1970). *The practice of creativity*. Collier Books.
14. Roukes, N. (1988). *Design Synectics: Stimulating Creativity in Design*. Davis Publications.
15. De Bono, E. (1970). *Lateral Thinking: Creativity Step by Step*. Harper & Row.
16. *Double screw vise*. (2015, November 30). [thomasguild.blogspot.com](https://thomasguild.blogspot.com/2015/11/double-screw-vise.html). <https://thomasguild.blogspot.com/2015/11/double-screw-vise.html>
17. Löffelholz Kodex. (2020, November 17). [machinethinking.co](https://machinethinking.co/2020/11/17/loffelholz-kodex). <https://machinethinking.co/2020/11/17/loffelholz-kodex>.
18. The History of Machine Vice. (2023, March 14). www.herbert.com/en-US/. <https://www.herbert.com/en-US/newsc25-the-history-of-machine-vice>.
19. *A brief history of the vice*. (dateless). www.wonkeedonkeetools.co.uk. <https://www.wonkeedonkeetools.co.uk/vices/a-brief-history-of-the-vice>.
20. *History - Bench Vice*. (dateless). www.heuer.de/en/. <https://www.heuer.de/en/company/history-bench-vice#:~:text=It%20was%20only%20with%20the,transformed%20into%20any%20shape%20easily>.
21. Benjamin F. Stephens. (1880). *Vise-jaws* (US Patent: 235,177). United States Patent and Trademark Office
22. Paulin Karl Kunze. (1913). *Reaction jaws for intimately clamping any shaped article* (AT Patent: AT-57,512). Austrian Patent Office
23. Paulin Karl Kunze. (1913). *Device for obtaining intimate contact with, engaging, or clamping bodies of any shape* (GB Patent: GB-191,206,479). Intellectual Property Office
24. Paulin Karl Kunze. (1913). *Device for obtaining intimate contact with, engaging, or clamping bodies of any shape* (US Patent: 1,059,545). United States Patent and Trademark Office
25. *Device for obtaining intimate contact with, engaging, or clamping bodies of any shape*. (dateless). patents.google.com. <https://patents.google.com/patent/US1059545A/en>.
26. Paulin Karl Kunze. (1922). *Multi-part jaw for snug contact with bodies of any shape, taking place under pressure equalization* (CH Patent: CH-96,512). Swiss Federal Institute of Intellectual Property.
27. *P. K. Kunze's Contribution To The World – A Vise With Oscillatable Cheeks*. (2021, November 8). tackyraccoons.com. <https://tackyraccoons.com/2021/11/08/p-k-kunzes-contribution-to-the-world-a-vise-with-oscillatable-cheeks>.
28. *Mantle & Co*. (2023, March 14). vintagemachinery.org. <http://vintagemachinery.org/mfgindex/detail.aspx?id=12319>.
29. Kuznietsov, Yu.M., Sinmin, H., Samoilenko, O.V. (2021). Peredumovy vykorystannia systemno-morfologichnoho pidkhopu ta teoriiy fraktaliv pry stvorenni leshchat dlia ob'ektiv skladnoi formy. *Naukovi visti KPI*, 4(134), 52-57. <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.4.261849/>

30. *Fraktalni leshchata yaki ne bachyly navit dosvidcheni maistry*. (2021, June 28). nevsedoma.com.ua/uk/. <https://nevsedoma.com.ua/uk/492541-fraktalni-leshchata-iaki-ne-bachyly-navit-dosvidcheni-maistry.html>.
31. *Getting to Grips With the Fractal Vise*. (2024, September 19). [www.metmo.co.uk](https://www.metmo.co.uk/blogs/news/getting-to-grips-with-the-fractal-vise?srsId=AfmBOoop9Vk-B1OKSsavj2bTjDj_1Oqs9Vsedf2hkFQYFquEyAx6zswSV). https://www.metmo.co.uk/blogs/news/getting-to-grips-with-the-fractal-vise?srsId=AfmBOoop9Vk-B1OKSsavj2bTjDj_1Oqs9Vsedf2hkFQYFquEyAx6zswSV.
32. Fractal Vise. (2021, July 09). [www.thingiverse.com](https://www.thingiverse.com/thing:4904044#google_vignette). https://www.thingiverse.com/thing:4904044#google_vignette.
33. Mandelbrot, B.B. (1975). *Les objets fractals: forme, hasard et dimension*. Flammarion.
34. Ferreiros, Jose. (1999). *Labyrinth of thought : a history of set theory and its role in modern mathematics*. Birkhäuser Verlag.

Отримано 08.12.2024

UDC 621.865.8

**Volodymyr Kravets¹, Oleksandr Kravets², Serhii Lapkovsky³,
Volodymyr Frolov⁴, Serhii Sapon⁵, Vasyl Prykhodko⁶**

¹Engineer of the Department of machine design

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

E-mail: bond118@meta.ua. **ORCID** <https://orcid.org/0009-0005-6867-4858>. **ResearcherID:** [ITU-8413-2023](https://orcid.org/0009-0005-6867-4858)²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machine design

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

E-mail: om.kravets@ukr.net. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956>. **ResearcherID:** [IUQ-7186-2023](https://orcid.org/0000-0002-7468-0956)³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

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

E-mail: Lapkovsky@ukr.net. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. **ResearcherID:** [HCH-3837-2022](https://orcid.org/0000-0002-9870-9231)⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

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

E-mail: v.k.frolov@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. **ResearcherID:** [ACH-0071-2022](https://orcid.org/0000-0002-3697-286X)⁵PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

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

E-mail: s.sapon@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>. **ResearcherID:** [IZE-2184-2023](https://orcid.org/0000-0003-1082-6431)⁶PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

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

E-mail: privas0718@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0003-1852-3777>. **ResearcherID:** [HDM-7277-2022](https://orcid.org/0000-0003-1852-3777)

**USING THE METHOD OF ANALOGIES IN DESIGNING
AN ADAPTIVE GRIPPERS**

The article is devoted to solving the problems of designing adaptive grippers of industrial robots or manipulators for transporting explosive objects that can be installed on mobile platforms. It is proposed to use the method of analogies when designing structures of adaptive grippers. As analogues of adaptive grippers, it is proposed to use the constructions and operating principles of vices with different configurations of jaws, with the possibility of adapting the kinematic structure of the latter to the geometry of the surfaces of the object to be gripped. The article provides an analysis of the evolution of vise designs from the beginning of their emergence. Special attention has been paid to fractal vices as an analogue of adaptive grippers of industrial robots or manipulators. Using the results of the analysis of the operating principle of the device of the Austrian engineer Paulin Karl Kunze (US Patent: 1,059,545 – Device for obtaining intimate contact with, engaging or clamping bodies of any shape) and the excellent advantages of the latter in terms of universality of gripping parts on curved surfaces, the possibility of designing a whole range of new original designs of adaptive grippers of industrial robots or manipulators for transporting explosives that can be installed on mobile platforms. The given technique makes it possible to systematically cover not only the designs of adaptive grippers already in production, but also to find those whose creation is possible and, in some cases, even expedient. Based on the use of this technique, several new designs of adaptive grippers for industrial robots or manipulators are proposed. These designs require further in-depth research.

Keywords: gripper; adaptive; industrial robot; construction; designing; method of analogies; vice; fractal; jaws; grasping.

Fig.: 10. References: 34.

Олександр Дмитрович Петров¹

¹аспірант кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)

E-mail: petrovsasha69@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9995-2246>

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОТВОРІВ У ДЕТАЛЯХ ІЗ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ СВЕРДЛАМИ З МОДИФІКОВАНИМИ РОБОЧИМИ ПОВЕРХНЯМИ

Стаття є оглядово-інформаційною. Тенденції останніх років у різних галузях машинобудування свідчать про дедалі ширше використання композиційних матеріалів (КМ). Серед широкого класу використовуваних КМ для виготовлення різноманітних деталей в авіа-, ракето-, суднобудуванні, енергетичному машинобудуванні значного поширення набули полімерні композиційні матеріали (ПКМ). Висока питома міцність, технологічність і жорсткість, порівняно низька собівартість роблять ПКМ незамінною альтернативою металевих матеріалів, які використовували раніше. Деталі та конструкції з ПКМ збираються з деталями та конструкціями з металевих матеріалів. Переважна більшість таких з'єднань виконують шляхом установки сполучних елементів (болтів, заклепок) у попередньо оброблені отвори, створюючи зокрема точкові механічні з'єднання. Основним технологічним чинником забезпечення надійності цих з'єднань насамперед є якість поверхні та точності одержаних отворів. Недотримання якісних параметрів може призвести до високих контактних навантажень, зниження ресурсу та руйнування конструкції (вузла). Технологічні процеси, що забезпечують якісні параметри отворів після механічної обробки, значною мірою залежать і визначаються використанням спеціального різального інструменту. Питання використання різального інструменту з модифікованими робочими поверхнями у вигляді дискретних ділянок для обробки деталей із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) на сьогоднішній час достатньо не вивчене, тому є актуальним.

Ключові слова: композитні матеріали (КМ); полімерні композитні матеріали (ПКМ); свердло; свердління; механічна обробка отворів; спеціальний ріжучий інструмент, якість отворів в деталях з ПКМ.

Рис.: 2. Табл.: 1. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. ПКМ є переважною альтернативою традиційним металевим матеріалам, у багатьох пріоритетних і наукомістких галузях машинобудування (авіа-, ракето-, судно-, енергетика, медицина, космос). Поверхні деталей з ПКМ можуть бути будь-якої вихідної складності та криволінійності. Використовуючи деталі з ПКМ, можна вирішити такі завдання, як підвищення міцності, корозійної стійкості, зниження ваги, зменшення радіолокаційної помітності тощо. Ціна виробництва деталей порівняно з металевими матеріалами зменшується через зниження частки механічної обробки та збільшення коефіцієнта використання матеріалу. При використанні деталей та конструкцій з ПКМ досягається збільшення ресурсу експлуатації у 2-5 разів, зниження маси конструкції та матеріаломісткості конструкції на 30...50 %, а також зниження трудомісткості виробництва на 20...40 % [1; 6]. Основний спосіб кріплення таких деталей і конструкцій із ПКМ, точкове механічне з'єднання (болтове/заклепувальне/шпилькове), при цьому виникає питання якості отриманих отворів, оскільки механічна обробка деталей із ПКМ має свою специфіку. Технологічний процес отримання якісного отвору деталей із ПКМ визначає наступну міцність та надійність з'єднання.

Постановка проблеми. Свердління є основною технологічною та найбільш трудомісткою операцією при механічній обробці деталей з ПКМ [1; 2; 10]. Важливою умовою є вибір різального інструменту та режимів різання, що дозволить на стадії технологічної підготовки виробництва керувати точністю та якістю поверхні отворів із забезпеченням високої продуктивності процесу свердління. Різальний інструмент, повинен забезпечувати необхідну точність і якість оброблюваної поверхні, мати високий опір зносу. Підвищення технологічності виготовлення дозволить знизити вартість інструменту і, як наслідок, вартість виробу з ПКМ. Тому питання щодо підвищення продуктивності інструменту та забезпечення якості оброблюваних отворів у ПКМ є актуальним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Неоднорідність ПКМ, що складається з двох і більше компонентів, серед яких виділяють матрицю (основу, яка виконує роль зв'язника), що забезпечує спільну роботу армуючих елементів і наповнювача (уцільнювача, волокон та дисперсних частинок), який виконує функцію армування, з можливістю отримання заздалегідь поставлених характеристик [3]. Механічні властивості КМ можна адаптувати для конкретного застосування шляхом зміни розташування армуючих елементів та за рахунок зміни пропорції «армуючі елементи/зв'язник». Фізико-механічними характеристиками ПКМ, відмінні від металів, тому є відмінності в механічній обробці виробів з ПКМ. До таких властивостей належать: анізотропія; абразивна дія наповнювача на ріжучий інструмент; пружність матеріалу, що обробляється, збільшує сили тертя; низька теплопровідність ПКМ; термічна деструкція; висока твердість наповнювача та низька пластичність зв'язуючого (матриці).

На міцність волокнистого полімерного композитного матеріалу (ПКМ) впливає багато факторів, що спричинено анізотропією цього матеріалу. Один із важливих факторів, який впливає на міцність, - це направлення прикладеної сили F (по осі z) відносно волокнистого, армуючого, наповнювача (рис. 1), направлення під кутом 0° , 45° , 90° та 135° (-45°).

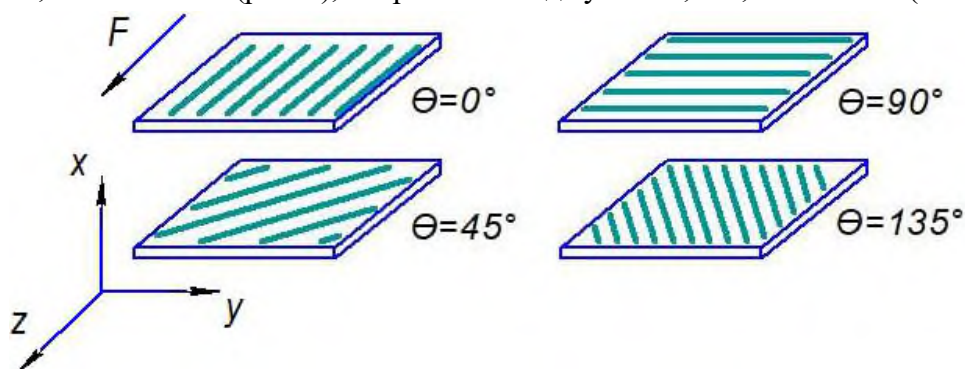


Рис. 1. Схема направлення волокон [6]

Питома міцність (межа міцності/густина) та жорсткість (модуль пружності/густина) високоміцного волокнистого наповнювача, особливо з вуглецю, вище ніж в інших матеріалах, у тому числі й металах, які застосовуються в аерокосмічній галузі. Це зумовлює найвищу структурну ефективність вуглепластиків у порівнянні з алюмінієвими та титановими сплавами. Поведінку композиту визначає співвідношення властивостей армуючих елементів і матриці, а також міцністю зв'язку між ними.

Ефективність та працездатність матеріалу залежить від правильного вибору вихідних компонентів та технології їх суміщення, призначеної забезпечити міцний зв'язок між компонентами при збереженні їхніх первісних характеристик. У результаті поєднання армуючих елементів і матриці утворюється комплекс властивостей композиту, який не тільки відображає вихідні характеристики його компонентів, а й включає у себе властивості, які ізольовані компоненти не мають. У полімерних композиційних матеріалах використовуються безперервні та короткі волокна діаметром $(5 \dots 200) \cdot 10^{-6}$ м, які є армуючими елементами або є основою для виготовлення ниток, джгутів, стрічок і тканин із різними типами плетіння. Нині при виготовленні ПКМ переважно застосовують скляні, борні, вуглецеві та високомодульні органічні волокна. Полімерні композитні матеріали широко використовуються в аерокосмічній, літакобудівній, суднобудівній, автомобілебудівній галузях дають суттєві переваги в масі, міцності, довговічності виготовлених виробів. Можливість зменшення маси без втрати та/або покращення механічних та міцностних характеристики дозволяє впроваджувати нові конструкції та удосконалювати наявні.

Полімерні композитні матеріали мають певні властивості, що значно відрізняються від традиційних металів та сплавів за своїми механічними властивостями і водночас вони мають меншу вагу. Фізико-механічні властивості полімерних композитних матеріалів характеризуються здатністю матеріалу набувати заданих параметрів у всьому діапазоні функціональних властивостей за допомогою різноманітних технологічних процесів і це накладає вимоги до технології обробки та переробки. Попри вдосконалення попередніх технологічних методів, таких як пресування, лиття, намотка, найпоширенішим процесом формування виробів із волокнистих полімерних композитних матеріалів є механічна обробка абразивним та лезвійним інструментом.

У конструкціях із полімерних композитних матеріалів найчастіше використовуються заклепувальні та шпильково-болтові з'єднання. Вони є найпоширенішими видами з'єднання, які забезпечують міцність, якість і найголовніше це необхідна надійність і ресурс роботи конструкцій. У конструкціях літальних апаратів основним видом з'єднання силових вузлів, таких як лонжерони, шпангоути нервюри є заклепувальні з'єднання. Для утворення механічного точкового з'єднання дуже відповідальною операцією є одержання отвору, від якості якого багато в чому залежить міцність з'єднання загалом. Сучасні літальні апарати можуть містити сотні тисяч кріпильних елементів або винищувач, де встановлюється 200...300 тис. заклепок або транспортний літак 1,5...3,0 млн заклепок залежно від розміру. Для встановлення заклепок необхідно виготовити якісні отвори в деталях, що з'єднуються. Оскільки ресурс літального апарату пропорційно залежить від ресурсу планера, основна причина його руйнування - це руйнування втомі, до 80 % яких починаються в місцях з'єднань його елементів [1; 6]. Специфіка конструкції накладає певні обмеження щодо застосування стандартного обладнання, у зв'язку з чим широко використовують ручні свердлильні машини. Основний метод отримання отворів у складальних елементах – це свердління отворів. Лезова обробка композитних матеріалів використовується для доведення деталей та виробів до заданих розмірів, а також для досягнення необхідної точності та якості поверхні та отримання складних конфігурацій виробу. Проведення аналогій з механічною обробкою металів не дає бажаного результату, оскільки процес різання композитних полімерних матеріалів істотно відрізняється від процесу різання металів. Різання осьовим інструментом складається з простої кінематики процесу, а саме надання обертального руху інструменту з певною швидкістю різання, переміщення та із заданою подачею. Цей процес можна реалізувати як ручний, так і автоматизований, що у свою чергу робить свердління найпоширенішою і найбільш доступним методом обробки отворів. Найбільш поширеною і одночасно найбільш трудомісткою операцією при обробці ПКМ є свердління. Трудомісткість свердлильних операцій на деяких виробках досягає 70...80 % загальної трудомісткості процесу механічної обробки. Природно, що в цих умовах неправильний вибір різального інструменту та режимів різання призводить до значних витрат.

Найпоширенішими видами з'єднання в конструкціях з ПКМ є заклепувальні та шпильково-болтові з'єднання, які забезпечують міцність, якість, надійність та ресурс роботи конструкцій [1; 4]. Утворення механічного точкового з'єднання є відповідальною операцією, від якості отвору залежить міцність з'єднання. Якість отвору визначається виконанням наступних вимог: розмірна точність діаметрів отворів; просторове положення осі отвору щодо поверхні; шорсткість отриманої поверхні; відхилення від циліндричності отриманого отвору (точність форми); кромки отвору не повинні мати сколів, тріщин, розривів, розшарування.

За даними літературних джерел [8] до виробів з ВПКМ ставляться різні вимоги залежно від специфіки призначення виробу. Так, для наукоємних виробництв, до яких відноситься аерокосмічна галузь вимоги: до точності та шорсткості поверхні, отриманої при свердлінні - IT 10 – 11, Rz ≤ 80мкм.

Одним з основних параметрів, що характеризують процес різання виробів із полімерних композитних матеріалів, є абразивний вплив наповнювача на різальний інструмент. Наявність у зоні різання твердих складових (скляні, борні чи вугільні волокна) призводить до абразивного зношування інструменту. Пружність матеріалу, що обробляється, особливо склотекстоліту, сприяє зростанню сил тертя на поверхні інструменту, що контактує з обробленим матеріалом (головним чином на задній поверхні).

Теплопровідність полімерних композитних матеріалів дуже низька (порівняно з теплопровідністю сталі вона меншою в 500...600 разів). Це зумовлює слабе відведення теплоти зі стружкою та в оброблюваний виріб, тому при обробці полімерних композитних матеріалів основна частка теплоти відводиться через різальний інструмент. Дослідження, проведені авторами [5; 7], показують, що при обробці склопластиків сталевим інструментом йому передається 99,2...99,8 % тепла, що виділяється. Підвищення температури полімерних композитів в області, прилеглої до зони різання, змінює механічні властивості цього шару, причому тим інтенсивніше, чим нижче теплостійкість оброблюваного матеріалу. Властивості, притаманні волокнистим полімерним композитним матеріалам, які мають властивості низької теплостійкості, визначають особливості теплових явищ при різанні. Термодеструкція і розкладання для більшості композитних матеріалів настає за температури більше ніж 300 °С. Це спричиняє збільшення дефектного шару у вигляді припалу на обробленій поверхні та збільшення загальної кількості дефектів. Знизити температуру можна за рахунок використання нових інструментальних матеріалів, що мають високу теплопровідність і це дозволить відводити температуру в інструмент або застосування переривчастого різання.

Мета і задачі дослідження. Метою цих досліджень є пошук шляхів забезпечення точності та якості отворів у деталях з ПКМ при обробці різанням.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Визначити критерії оцінки якості отворів.
2. Дослідити фактори, що впливають на показники точності та якості отворів.
3. Дослідити умови підвищення ефективності механічної обробки та забезпечення якості отворів у деталях із ВПКМ інструментом з модифікованими робочими поверхнями.

Матеріали та методи дослідження.

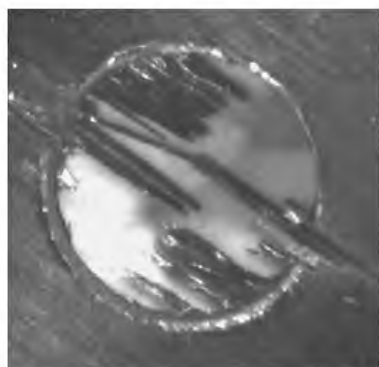
Основний показник оброблених отворів – це їхня якість, він включає: розмірну точність діаметрів отворів, точність форми, взаємне розташування отворів, шорсткість поверхонь. Отримана шорсткість повною мірою не забезпечує інформацією про якість обробленої поверхні. Аналіз явищ, супутніх процесам різання полімерних композитних матеріалів, показує, що простий перенос закономірностей процесу різання металів для цих матеріалів неприпустимий. Необхідно враховувати природу полімерних композитних матеріалів, їхню структуру та властивості. При затупленні інструменту - через низьку адгезію сполучного з армуючим волокном при збільшенні сил різання утворюються тріщини між волокном і матрицею, відбувається викрашування матриці з оброблюваної поверхні виробу, особливо в місцях входу та виходу інструменту, що позначається на якості обробки. Складна структура призводить до того, що при підвищених зносах інструменту відбувається розшарування матеріалу. Крім того, при перерізанні армуючих волокон, особливо при перехресному армуванні, спостерігається розпушування переріжаних волокон, що погіршує якість обробленої поверхні і змушує іноді застосовувати додаткову операцію доведення. У деталях з волокнистого полімерного композитного матеріалу, традиційно використовувані параметри шорсткості обробленої поверхні не забезпечують повної інформації про мікрорельєф і якість поверхні отворів унаслідок наявності, ворсистості – виступання над поверхневим шаром незріжаних волокон волокнистого наповнювача. Характерним пошкодженням поверхонь отворів у деталях із волокнистого

полімерного композитного матеріалу являються міжшарові тріщини та термічна деструкція. Види пошкоджень поверхні отворів з волокнистого полімерного композитного матеріалу розглянуті [2; 3; 4; 5; 6; 7] (табл. 1).

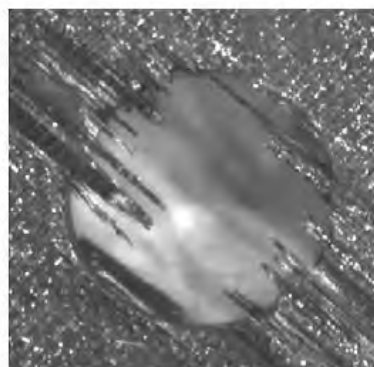
Таблиця 1 – Види пошкоджень поверхні отворів із волокнистого полімерного композитного матеріалу

Вид пошкодження	Характеристика	Причина виникнення
Розшарування зовнішніх шарів у поверхні врізання ріжучого інструменту	Рівномірне розшарування шарів на поверхні врізання інструменту	Сила різання, діюча зі сторони стрічки й перемички, більша міцність міжшарового зв'язку верхнього шару
Розшарування зовнішніх шарів у поверхні виходу ріжучого інструменту	Частина волокон на виході інструменту з отвору залишається незрізаною	Не зрізання нижнього шару через його деформацію і відшарування
Міжшарові тріщини	Формування міжшарових тріщин багатшарового ВПКМ в середині отвору	Осьова сила різання, велика міцність міжшарового зв'язку
Витягування волокон	Витягування волокон з матриці	Незначна адгезія волокон до матриці за умов дії осьової сили
Сколювання кромки	Мікроруйнування кромки отвору	Підвищена крихкість, вібрації при різанні
Термічна деструкція	Пошкодження поверхні отвору через підвищену температуру	Температура різання вища за допустиму

Розглядаючи параметри якості оброблених отворів при свердлінні полімерних композитних матеріалах визначаємо основну особливість це виникнення осьової сили, вздовж осі отвору, що призводить до розшарування на вході та виході інструменту, утворення міжшарових тріщин. Розшарування - це характерний вид пошкодження отворів із полімерних композитних матеріалів, коли сили різання прагнуть відірвати один шар від іншого оскільки дії сили різання часто прикладено перпендикулярно до площини армування. Також до полімерних композитних матеріалів застосовують показники пошкоджуваності оброблених отворів, до яких належать: відколи кромки отворів, витягування волокон, ворсистість, термічна деструкція, розпушування волокон та інших ушкоджень отворів. Як уже було зазначено, характерним видом пошкодження отворів в деталях з волокнистих полімерних композитних матеріалів являється розшарування. Попри різні механізми виникнення дефекту розшарування, зрештою вони призводять до порушення цілісності структури волокнистих полімерних композитних матеріалів. Залежно від причини виникнення дефекту розглядають розшарування зовнішнього шару на поверхні врізання ріжучого інструменту(рис. 2, а) та розшарування зовнішнього шару на поверхні виходу ріжучого інструменту(рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Дефекти обробленої поверхні

Цей вид пошкодження відрізняється від міжшарової тріщини тим, що формується виключно на зовнішніх шарах волокнистих полімерних композитних матеріалів. До основних причин розшарування навіть при обробці «гострим» інструментом (свердлом) можна віднести: при розшаруванні зовнішнього шару на поверхні врізання ріжучого інструменту – наявність перемички в інструмента та негативних передніх кутів у цій зоні, а також велика подача; при розшаруванні зовнішнього шару на поверхні виходу ріжучого інструменту, переважно велика подача. Додатково розшарування зовнішніх шарів у поверхні врізання ріжучого інструменту виникає через дію сил, притискаючих верхні шари волокнистих полімерних композитних матеріалів. Частина зрізаного матеріалу, тобто формована стружка, починає намотуватись (закручуватись) у стружку вивідних канавках свердла й ущільнювати ще до того, як він буде повністю відділено від відповідного слою волокнистого полімерного композитного матеріалу, як наслідок, у зоні контакту обробленої поверхні виникають відносно великі сили тертя, особливо за великої подачі. Ці сили призводять до того, що переміщується вздовж стружкової канавки досить сильно ущільнена частина зрізаного шару, впливає на верхні шари заготовки, які в цій зоні утримуються тільки силами міжшарових зв'язків та прагне їх розділити.

Таким чином, схильність до розшарування біля поверхні врізання визначається властивостями оброблюваного та інструментального матеріалів, режимом різання, конструкцією інструменту і величинами діючих сил різання, в першу чергу осьових. Розшарування зовнішніх шарів біля поверхні виходу ріжучого інструменту - пошкодження, яке відбувається в міжшарових областях нижніх шарів волокнистих полімерних композитних матеріалів при виході різального інструменту з контакту з шаруватою заготовкою. За певних умов напруження, що виникає в результаті дії осьової сили різання, може перевищувати міцність міжшарових зв'язків у ще повністю незрізаних шарах формованого отвору.

Під дією осьової сили ще незрізані шари згинаються, що призводить до порушення умови міцності між шарами, формування та поширення тріщини в міжшаровому просторі й до розриву адгезійних зв'язків між окремими шарами та розшарування незрізаних шарів листа волокнистого полімерного композитного матеріалу. Експерименти показали, що розшарування при свердлінні найбільш активно відбувається в момент впливу поперечної ріжучої кромки на шари, що попереду лежать («нижні») і її виходу з контакту з заготовкою. Експериментально доведено [9], що при свердлінні розшарування біля поверхні врізання набагато менше, ніж у поверхні виходу з отвору. Розшарування зовнішніх шарів сприяє не зрізанню волокнистого наповнювача, особливо якщо на поверхні листа волокнистого полімерного композитного матеріалу присутній односпрямований шар. Тому пов'язані з розшаруванням ушкодження вздовж отвору нерівномірні. Область пошкодження навколо отвору має частково еліптичну форму, причому велика вісь цього еліпса орієнтується вздовж напрямку волокон. Незрізані волокна можуть спостерігатися на поверхні входу свердла в заготовку, так і на поверхні виходу свердла з отвору. Залежно від властивостей волокон оброблюваного листа волокнистого полімерного композитного матеріалу та схеми їх укладання ушкодження можуть мати вигляд задирок та/або розпушених волокон [8]. Задирки є окремими незрізаними волокнами достатньо правильної форми, а розпушування - відносно велика кількість незрізаних волокон по периметру отвору. Розпушування зазвичай виникає в області різання з гострим кутом направлення волокон відносно ріжучої кромки в умовах коли обробка виконується інструментом зі збільшеним радіусом скруглення ріжучої кромки.

На точність впливають пружна деформація системи під дією сили різання та пружне відновлення обробленого матеріалу, усадка обробленого отвору характерна особливість обробки полімерних композитних матеріалів. Зменшення радіуса ріжучої кромки зменшує залишкову деформацію отворів [9; 10], та/або збільшують задні кути. Зношування

інструменту призводить до збільшених сил різання, збільшення задирки, розшарування, термічної деструкції, збільшення шорсткості. Великий вплив на точність і якість обробленої поверхні, стійкість і міцність інструменту мають геометричні параметри ріжучого інструменту. Вибір їх оптимальних величин має велике практичне значення. Основними геометричними параметрами ріжучої частини свердла є: кут при вершині 2ϕ ; задній кут α ; передній кут γ . Рекомендовані форми заточування різальної частини свердла зі швидкорізальних і твердосплавних сталей розглянуті [12]. Найбільший вплив на якість оброблених отворів та знос свердлів надає кут при вершині свердла 2ϕ . Зі зменшенням цього кута знижується осьова сила, збільшується довжина ріжучої кромки, а отже, питомий тиск на одиницю довжини ріжучої кромки стає менше, а це у свою чергу призводить до меншого зношування свердла. Однак надмірне зменшення кута 2ϕ впливає на тепловідведення, що призводить до перегріву свердла та погіршенню якості отвору. Тільки розгортання та свердління по кондуктору дозволяє більш точно виконувати отвори. Зі збільшенням заднього, кута α відбувається зменшення тертя по задній грані, що сприяє меншому викрашуванню матриці і, як наслідок, підвищенню чистоти кромки отворів. Однак при значному збільшенні відбувається погіршення чистоти отвору. Зі збільшенням переднього кута γ шорсткість отворів збільшується. У стандартних свердел здебільшого передні кути великі, що й викликає розшарування кромки отворів, особливо у момент виходу свердла з отворів. Неправильно вибрані геометричні параметри свердла та робота з великим його зносом різко погіршують якість оброблюваної поверхні отвору. Під якістю поверхні маються на увазі не тільки шорсткість обробленої поверхні, а і стан отворів на вході та виході свердла, а також точність обробленої поверхні. На вході свердла, особливо при свердлінні у напрямку, перпендикулярно армуючим волокнам, можуть з'являтися розпушування матеріалу. На виході свердла з'являються розшарування та сколи. Висока пружність полімерних композитних матеріалів призводить у процесі свердління до пружного стискаючого навантаження по всій довжині ріжучої частини свердла. Після вилучення свердла стискаючі навантаження зникають, і матеріал, після пружної деформації, відновлюється, що призводить до зменшення діаметра отвору.

Пружне відновлення залежить не лише від характеристик оброблюваного матеріалу, але і від геометричних параметрів свердла, сил різання, режимів обробки. При застосуванні свердел оптимальної геометрії може бути зведено до мінімуму. У зв'язку з цим рекомендується збільшувати діаметр свердла в порівнянні з необхідним діаметром отвору. З іншого боку, биття свердла і шпинделя свердлильного верстата впливає на точність обробки в значно більшою мірою, ніж явище усадки отвору. Дослідження, проведені в роботах [9], дозволяють зробити висновок про те, що при виборі діаметра свердла немає потреби враховувати пружне відновлення матеріалу, оскільки, по-перше, воно компенсується розбиванням отвору за рахунок биття свердла та шпинделя, по-друге, допуск 11...12 квалітетів досить великий і діаметри просвердлених отворів не вийдуть за межі.

На точність отвору впливають технологічні умови свердління - за розміткою або кондуктором. При свердлінні за кондуктором дещо зменшується биття, що призводить до підвищення точності свердління. Однак практично за будь-яких технологічних умов свердління отворів у ПКМ швидкорізальними та твердосплавними свердлами забезпечує отримання отворів 11...12 квалітетів з шорсткістю $Rz = 20...40$ мкм.

При оптимальній геометрії свердла якість поверхні визначається шорсткістю, яка залежить від режимів різання та інших факторів. Проведені у роботах [6] дослідження дозволяють зробити висновок, що збільшення подачі та діаметра свердління призводить до погіршення шорсткості поверхні. На якість отвору (особливо на вході та виході ріжучого інструменту) впливає і знос свердла. Роботи ряду дослідників [12; 13; 14] показують, що при зносі свердла позадньої поверхні $h_3 = 0 - 0,15$ мм параметр шорсткості мало змінюється і становить $Rz = 20 - 40$ мкм.

Однак при $h_3 > 0,15$ мм спостерігається суттєве розшарування матеріалу, особливо на вході свердла. На виході свердла спостерігаються розшарування або відколи оброблюваного матеріалу.

Збільшення швидкості різання та подачі призводить до зниження стійкості, причому найбільш сильний вплив на зміну стійкості надає швидкість різання. В основному зношування інструменту при обробці композитів відбувається по задній поверхні інструменту внаслідок пружного відновлення матеріалу. Знос по передній поверхні інструменту незначний і є наслідком абразивного зносу матеріалу заготовки, що руйнується, а також тертя стружки по передній поверхні і значних температур в зоні різання. Головною умовою при різанні композитів є гострота ріжучої кромки інструменту, яка повинна запобігти будь-якому тертю між інструментом і заготовкою. На теперішній час багато досліджень присвячені пошуку нових видів обробки різанням, таким як, наприклад, гідрорізання та ультразвукового різання [10], застосування нових прогресивних схем різання – із застосуванням реверсивного руху [11], дослідженню та розробки нових конструкцій та геометрії різального інструменту [10; 11], визначенню оптимальних режимів обробки, нових інструментальних матеріалів та покриттів на різальний інструмент для обробки волокнистих полімерних композитних матеріалів. Однак у більшості випадків із прагненням підвищити якість обробки виробів із волокнистих полімерних композитних матеріалів знижується продуктивність, а використання нових альтернативних методів обробки потребує залучення допоміжного обладнання, та пристосувань, що в кінцевому випадку вплине на собівартість виробу.

При збільшенні сил різання та затупленні інструменту утворюються тріщини між волокном і матрицею, відбувається викрашування матриці з оброблюваної поверхні виробу, особливо в місцях входу та виходу інструменту.

Експерименти [4; 5] показали, що розшарування при свердлінні найбільш активно відбувається в момент впливу поперечної ріжучої кромки на шари, що лежать попереду («нижні») і її виходу з контакту із заготовкою. Пов'язані з розшаруванням ушкодження вздовж отвору нерівномірні. Область пошкодження навколо отвору має частково еліптичну форму [5; 10]. На точність впливають пружна деформація системи під дією сили різання та пружне відновлення обробленого матеріалу, усадка обробленого отвору характерна особливість обробки полімерних композитних матеріалів. Зменшення радіуса ріжучої кромки та/або збільшення заднього кута зменшує залишкову деформацію отворів [4; 8]. Зношування інструменту призводить до збільшених сил різання, збільшення задирок, розшарування, термічної деструкції, збільшення шорсткості. Здебільшого зношування інструменту при обробці композитів відбувається по задній поверхні інструменту внаслідок пружного відновлення матеріалу. Знос по передній поверхні інструменту незначний і є наслідком абразивного зносу матеріалу заготовки, що руйнується, а також тертя стружки по передній поверхні та значних температур у зоні різання.

Термодеструкція і розкладання для більшості ПКМ наступає за температури більше ніж $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, збільшення дефектного шару у вигляді припалу та збільшення загальної кількості дефектів. Знизити температуру можна за рахунок використання нових інструментальних матеріалів, що мають високу теплопровідність і це дозволить відводити температуру в інструмент або застосування переривчастого різання.

Використання швидкорізальних сталей обмежене через слабкий опір абразивному зношуванню, що ускладнює зрізання волокон у результаті чого спостерігається їх виривання з матриці та розшарування. З метою підвищення продуктивності використовують нанесення покриттів у різний спосіб, таких як CVD, PVD. Великий вплив на точність і якість обробленої поверхні, стійкість і міцність інструменту мають геометричні параметри ріжучого інструменту. Основними геометричними параметрами ріжучої частини

свердла ϵ : кут при вершині 2ϕ ; задній кут α ; передній кут γ . Найбільший вплив на якість оброблених отворів та знос свердла надає кут при вершині свердла 2ϕ . Зі зменшенням кута 2ϕ знижується осьова сила, збільшується довжина ріжучої кромки. Надмірне зменшення кута 2ϕ впливає на тепловідведення, що призводить до перегріву свердла та погіршенню якості отвору. Зі збільшенням заднього, кута α відбувається зменшення тертя по задній грані, що сприяє меншому викрашуванню матриці і, як наслідок, підвищенню чистоти кромок отворів. Однак при значному збільшенні відбувається погіршення чистоти отвору. Зі збільшенням переднього кута γ шорсткість отворів збільшується.

Висновки. У вітчизняній та зарубіжній літературі практично відсутні систематизовані відомості про механічну обробку отворів в деталях з ПКМ.

А саме:

- відсутність методик розрахунку, що визначають вплив температурних факторів процесу різання на точність отворів деталей з ПКМ;
- відсутність коректних моделей, що описують вплив режимів різання на якість поверхні та точність отворів залежно від матеріалу та геометрії інструменту в деталях із ПКМ;
- відсутність різних конструкцій інструменту (свердла) для обробки ПКМ вітчизняного виробництва, серійного виконання. Весь інструмент має дуже високу вартість і не гарантує отримання необхідної точності отворів;
- відсутні також рекомендації щодо вибору різальних інструментів, обладнання та оптимальних режимів обробки.

Нині на підприємствах, що спеціалізуються на виробництві виробів з ПКМ, такі види механічної обробки, як свердління виробляються найчастіше лезовим осьовим інструментом. У результаті проведення науково-технічних досліджень та патентних досліджень виявлено, що технічний рівень підготовки різального інструменту для обробки ПКМ, не до кінця досліджений.

Проведений аналіз існуючих рішень та методів обробки для підвищення та забезпечення якості оброблюваної поверхні показав, що одним із перспективних напрямів вирішення проблеми є дослідження щодо модифікування робочої поверхні свердла шляхом нанесення на нього покриття дискретного типу є актуальним.

Список використаних джерел

1. Martin, R. Reducing Costs in Aircraft: The Metals Affordability Initiative Consortium / R. Martin, D. Evans // Journal of Operations Management. – 2000. – Vol. 52, № 3. – Pp. 24-28.
2. Drilling of composite structures / F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin // Composite Structures. – 2001. – Vol. 52. – Pp. 511-516.
3. Faria P. E. Dimensional and Geometric Deviations Induced by Drilling of Polymeric Composite / P. E. Faria, J. C. Campos Rubio, A. M. Abrao // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2009. – Vol. 28, № 19. – Pp. 2353-2364.
4. Sheikh-Ahmad, J. Y. Machining of Polymer Composites / J. Y. SheikhAhmad. – Technology & Engineering, 2008. – 230 p.
5. Campbell, F. C. Manufacturing Processes for Advanced Composites / F. C. Campbell // Elsevier Science. – 2004. – № 1. – 532 p.
6. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор): монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залогова, В. А. Пасечник, В. А. Колесник, С. С. Емельяненко. – Сумы, 2013. – 272 с.
7. Лабунець, В. Ф. Перспективи використання композиційних матеріалів в авіакосмічній галузі / В. Ф. Лабунець, Є. В. Корбут, Ю. І. Адаменко // Проблеми тертя та зношування. – 2011. – Вип. 56. – С. 89-96.
8. Тарасюк, А. П. Технологии механической обработки полимерных композитов: монография / А. П. Тарасюк, О. Л. Кондратюк, Н. В. Вереzub. – Харьков : Точка, 2015. – 226 с.

9. Тарасюк, А. П. Вибір раціональних умов різання полімерних композитів, що забезпечують максимальні показники якості поверхні / А. П. Тарасюк // Вісник Сумського державного університету. Сер. : Технічні науки. – 2012. – № 4. – С. 155-161.
10. Wang, X. Investigation on trust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics / X. Wang, I. Wang // *Journal Mater. Process. Technol.* – 2004. – Vol. 1486. – Pp. 239-244.
11. Comparison of Tool Effects on Hybrid Laminates after Drilling / L. M. Durao, J. M. Tavares, A. T. Marques [et al.] // 5th International Conference on Mechanics and Materials in Design. – Porto, 2006. – Pp. 1-14.
12. Kim, D. Drilling process optimization for graphite/bismaleimide–titanium alloy stacks / D. Kim, M. Ramulu // *Composite Structures.* – 2004. – Vol. 63, № 1. – Pp. 101-114.
13. Лупкин Б. В. Сверление ПКМ сверлами с подрезающими режущими кромками / Б. В. Лупкин, О. М. Кошкина, А. Л. Касс // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2011. – № 49. – С. 68-80.
14. Проблеми ефективного впровадження процесів високошвидкісного різання / Ю. Н. Внуков, И. Н. Павлюченко, К. О. Папашев, А. Г. Саржинская // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2006. – Т. 1. – С. 43-57.

References

1. Martin, R., & Evans, D. (2000). Reducing costs in aircraft: The Metals Affordability Initiative Consortium. *Journal of Operations Management*, 52(3), 24–28.
2. Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F., & Surcin, L. (2001). Drilling of composite structures. *Composite Structures*, 52, 511–516.
3. Faria, P. E., Campos Rubio, J. C., & Abrao, A. M. (2009). Dimensional and geometric deviations induced by drilling of polymeric composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(19), 2353–2364.
4. Sheikh-Ahmad, J. Y. (2008). *Machining of polymer composites*. Technology & Engineering.
5. Campbell, F. C. (2004). *Manufacturing processes for advanced composites* (Issue 1). Elsevier Science.
6. Kryvoruchko, D. V., Zaloga, V. A., Pasechnik, V. A., Kolesnyk, V. A., & Emelyanenko, S. S. (2013). *Mekhanicheskaya obrabotka kompozitsionnykh materialov pri sborke letatel'nykh apparatov (analiticheskii obzor)* [Mechanical processing of composite materials during the assembly of aircraft (analytical review)]. Sumy.
7. Labunets, V. F., Korbut, Ye. V., & Adamenko, Yu. I. (2011). Perspektyvy vykorystannya kompozytsiynykh materialiv v aviakosmichniy haluzi [Prospects for the use of composite materials in the aerospace industry]. *Problemy terya ta znoshuvannya – Friction and wear problems*, 56, 89–96.
8. Tarasyuk, A. P., Kondratiuk, O. L., & Verezub, N. V. (2015). *Tekhnolohiya mekhanichnoyi obrobky polimernykh materialiv* [Technology of Mechanical Processing of Polymer Materials].
9. Tarasyuk, A. P. (2012). Vybir ratsionalnykh umov rizannya polimernykh kompozytiv, shcho zabezpechuyut maksymalni pokaznyky yakosti poverkhni [Selection of rational conditions for cutting polymer composites that provide maximum surface quality indicators]. *Visnyk SumDU, Seriya "Tekhnichni nauky"* – *Bulletin of Sumy State University, Series "Technical Sciences"*, 4, 155–161.
10. Wang, X., & Wang, I. (2004). Investigation on trust in vibration drilling of fiber-reinforced plastics. *Journal of Materials Processing Technology*, 148(6), 239–244.
11. Durao, L. M., Tavares, J. M., Marques, A. T., et al. (2006). Comparison of tool effects on hybrid laminates after drilling. In *5th International Conference on Mechanics and Materials in Design* (pp. 1–14). Porto.
12. Kim, D., & Ramulu, M. (2004). Drilling process optimization for graphite/bismaleimide–titanium alloy stacks. *Composite Structures*, 63(1), 101–114.
13. Lupkin, B. V., Koshkina, O. M., & Kass, A. L. (2011). Kass Sverdlinnya PKM sverdlami z pidrizuyuchymy rizuchymy kromkamy [Kass PCM drilling with drills with undercutting cutting edges]. *Viddkryti informatsiyni ta kompyuterni intehrovani tekhnolohiyi – Open information and computer integrated technologies*, 49, 68–80.

14. Vnukov, Yu. N., Pavlyuchenko, I. N., Papashev, K. O., & Sarzhynska, A. H. (2006). Problemy efektyvnoho vprovadzhennya protsesiv vysokoshvydkisnoho rizannya [Problems of effective implementation of high-speed cutting processes]. *Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni – Modern technologies in mechanical engineering*, 1, 43–57.

Отримано 19.12.2024

UDC 621.891

Oleksandr Petrov¹

¹PhD student at the Department at the Machine Design

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

E-mail: petrovsasha69@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9995-2246>

ENSURING THE QUALITY OF HOLES IN PARTS MADE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS WITH DRILLS WITH MODIFIED WORKING SURFACES

The article is an overview and information. Trends in recent years in various branches of mechanical engineering indicate the increasingly widespread use of composite materials (CM). Among the wide class of CM used for the manufacture of various parts in aircraft, rockets, shipbuilding, and power engineering, polymer composite materials (PCM) have become widely used. High specific strength, manufacturability and rigidity, and relatively low cost make PCM an indispensable alternative to metal materials used earlier. Parts and structures made of PCM are assembled with parts and structures made of metal materials. The vast majority of such connections are made by installing connecting elements (bolts, rivets) in pre-machined holes, creating, among other things, point mechanical connections. The main technological factor for ensuring the reliability of these connections is, first of all, the quality of the surface and the accuracy of the holes obtained. Failure to comply with quality parameters can lead to high contact loads, reduced service life, and destruction of the structure (unit). Technological processes that ensure the quality parameters of holes after machining are largely dependent and determined by the use of a special cutting tool. The issue of using cutting tools with modified working surfaces in the form of discrete areas for machining parts made of polymer composite materials (PCM) has not been sufficiently studied to date, therefore it is relevant.

Keywords: composite materials (CM); polymer composite materials (PCM); drill; drilling; machining of holes; special cutting tool, quality of holes in PCM parts.

Fig.: 2. Table: 1. References: 14.

Світлана Іванівна Радкевич¹, Ігор Володимирович Луців²¹аспірантка кафедри механічної інженерії

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: asp_rsi@student.ztu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8791-1653>²доктор технічних наук, професор кафедри механічної інженерії

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: kmi_liv@ztu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3980-428X>**ЗАЛЕЖНІСТЬ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПОВЕРХНІ ВИРОБУ
ВІД УМОВ РІЗАННЯ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ**

Торцеве фрезерування є одним із найефективніших процесів механічної обробки, який забезпечує високу точність та якість плоских поверхонь виробів. Однак цей процес супроводжується виникненням внутрішніх залишкових напружень. Вони можуть бути як стискуючими, так і розтягуючими. Ці напруження можуть негативно впливати на експлуатаційні властивості виробів, тому їх слід уникати. У цій статті представлено аналіз результатів досліджень, які описують механізми утворення та прогнозування залишкових напружень під час фрезерування, а також методи їх виявлення та інші допоміжні способи контролю. Проведено аналіз механізмів формування залишкових напружень та їхня залежність від режимів різання, видів інструментальних різальних матеріалів та зношування інструмента. Описано ключові фактори, що впливають на характер і величину внутрішніх залишкових напружень, які виникають при фрезеруванні плоских поверхонь виробів із важкооброблюваних матеріалів.

Ключові слова: торцеве фрезерування; залишкові напруження; плоскі поверхні; сили різання; зношування; поверхневий шар.

Рис.: 7. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю оптимізації умов торцевого фрезерування для забезпечення керування залишковими напруженнями, що впливають на міцність, довговічність і якість виробів у сучасному машинобудуванні.

Постановка проблеми. Надійна робота сучасних машин і механізмів значною мірою залежить від експлуатаційних властивостей їхніх відповідальних деталей, які у свою чергу залежать від точності виготовлення, якості поверхні й поверхневого шару деталі. Якість поверхневого шару визначається мікрогеометрією поверхні, фізико-механічними властивостями матеріалу, станом залишкових напружень, твердістю, структурою та зносостійкістю. Ці параметри формуються під час механічної обробки на фінішних операціях. Вони безпосередньо впливають на експлуатаційні властивості деталей, включаючи стійкість до утворення тріщин, втомну міцність і здатність протистояти зносу. Розуміння розподілу і типів залишкових напружень дозволяє передбачити втомні руйнування [1]. Особливої уваги потребують плоскі поверхні великих розмірів, які піддаються значним статичним і динамічним навантаженням (наприклад, станини верстатів, корпуси машин, блоки циліндрів). Нерівномірність розподілу залишкових напружень у таких поверхнях може призводити до викривлення, зниження точності монтажу, виникнення мікротріщин та втрату структурної цілісності. Одним із найефективніших способів обробки плоских поверхонь є торцеве фрезерування [2-4]. Цей процес дозволяє створювати поверхні з низькою шорсткістю та високою точністю завдяки використанню сучасних інструментів і обладнання. Їх використання зменшує зношуваність та забезпечує стабільність обробки. Проте водночас торцеве фрезерування супроводжується утворенням залишкових напружень у поверхневому шарі [5]. Вони можуть негативно впливати на довговічність деталі. Ці залишкові напруження можуть бути двох типів: стискуючі та розтягуючі. Більш бажаними в процесі фінішної обробки є залишкові напруження стиску, оскільки вони можуть уповільнювати поширення тріщин, тим самим продовжуючи термін служби виробів [6]. Залишкові напруження розтягу є небажаними, адже можуть негативно впливати на міцність та інші механічні властивості заготовок, спричиняючи такі дефекти, як деформація та тріщини під час експлуатації виробів [7]. Зменшити цей негативний вплив під

час фрезерування можна за рахунок вибору оптимальних режимів різання (швидкість, подача, глибина різання) та різального інструментального матеріалу. Тому актуальним є дослідження залежностей характеру і величини залишкових напружень від них.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Є багато робіт закордонних і вітчизняних учених, присвячених дослідженню виникнення залишкових напружень у поверхневих шарах після механічної обробки. Зокрема, це роботи таких науковців, як М. В. Новіков, В. О. Шепелев, С. А. Клименко, П. П. Мельничук, В. А. Сторошук, С. Huang, R. Su, B. Zou, J. Wang, Z. Liu, C. Li, Smith, J. Yang Y. досліджували. Однак серед них не так багато робіт, у яких досліджувалося питання виникнення внутрішніх напружень у поверхневому шарі після фінішного торцевого фрезерування чавунів. Науковці М. Е. Kara, А. Т. Kuzu, М. Bakka, Іu J., С. Huang, Su R., Zou B., Wang J., Liu Z., Li C., Smith, J. Yang Y. досліджували характер формування залишкових напружень при торцевому фрезеруванні чавунів із вермикулярним графітом. Вони повідомили, що в зоні різання під час торцевого фрезерування чавунів, при взаємодії механічних і теплових процесів, можуть виникати залишкові напруження як стиску, так і розтягу, впливаючи на якість оброблених поверхонь та експлуатаційні характеристики готових виробів [10-17].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що механізм утворення залишкових напружень та їхній рівень під час торцевого фрезерування залежить від багатьох факторів, таких як вид інструментального матеріалу, режими різання та властивості матеріалу оброблюваної деталі. Проте недостатньо вивченим залишається вплив взаємодії цих факторів, характер залишкових напружень у мікроструктурі матеріалу та способи ефективного управління ними для забезпечення бажаних характеристик готових виробів.

Мета статті - дослідити механізми утворення внутрішніх напружень та їхній рівень у результаті торцевого фрезерування плоских поверхонь.

Виклад основного матеріалу. Для визначення залишкових напружень використовуються руйнівні, напівруйнівні та неруйнівні методи. Руйнівні методи (різання та свердління отворів (ICHN)), дозволяють вимірювати характер та рівень внутрішніх залишкових напружень, але змінюють структуру зразка. Неруйнівні методи, такі як рентгенівська дифракція (XRD) і ультразвукове тестування, дозволяють вимірювати характер та рівень внутрішніх залишкових напружень, не змінюючи структуру зразка. Кожен метод обирається залежно від геометрії, глибини аналізу та вимог до точності [10]. Найчастіше для визначення залишкових напружень, які виникають після фрезерування плоских поверхонь виробів, застосовують метод рентгенівської дифракції. Цей метод був застосований у всіх проаналізованих наукових працях. У більшості робіт були представлені результати щодо сили різання та залишкового напруження, що дозволило встановити зв'язок між рівнем прикладених сил під час обробки та характером і величиною залишкових напружень у поверхневих шарах матеріалу. У роботі [12] автори проаналізували, як змінюються сили різання, шорсткість поверхні та залишкові напруження при зміні режимів різання та різального інструментального матеріалу. Згідно з отриманими залежностями в роботі [12] зазначено, що при збільшенні швидкості різання від 200 до 1000 м/хв сили різання спочатку зростали, досягаючи максимуму, а потім знижувалися як для кераміки, так і для твердосплавів. При низьких швидкостях різання, коли сили різання високі формуються розтягуючі залишкові напруження. При середніх швидкостях різання, максимальні сили різання збільшують пластичну деформацію, сприяючи утворенню стискаючих залишкових напружень у глибших шарах, але можуть посилювати ризик пошкоджень по-

верхні. При високих швидкостях різання, відмічалось зменшення залишкових напружень і перехід їх до нейтрального стану. При збільшенні подачі як для кераміки, так і для твердосплава збільшувалися сили різання, формуючи сильні стискаючі залишкові напруження, але це підвищує ризик утворення дефектів через пластичну деформацію. Загалом інструменти з кераміки створюють більш виражені стискаючі напруження, особливо при великих подачах, завдяки своїм високотемпературним властивостям.

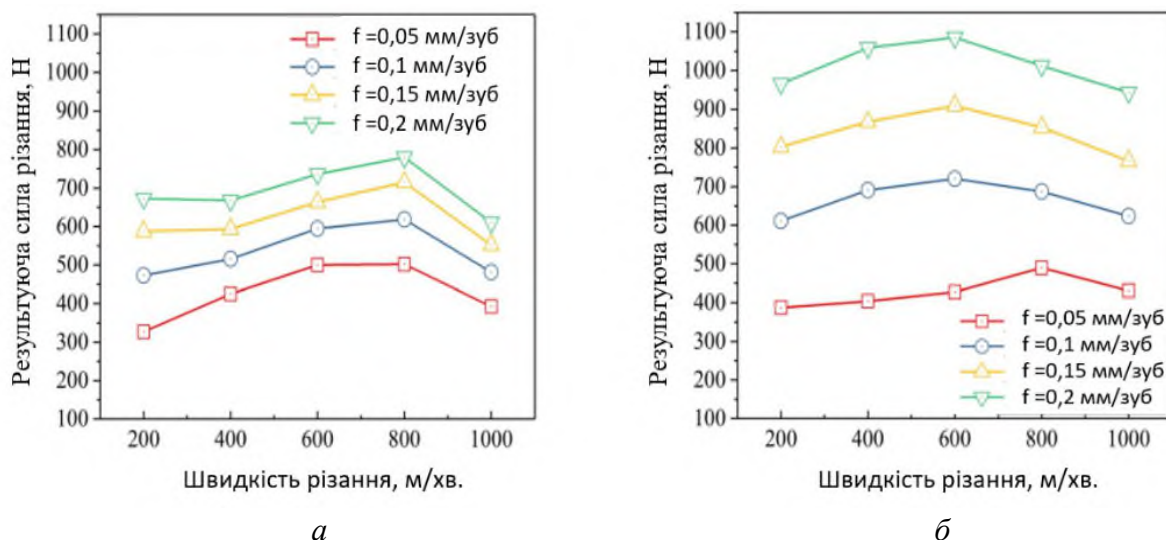


Рис. 1. Результуючі сили різання при фрезеруванні чавуну з вермикулярним графітом при використанні:

а – твердосплавного інструменту; б – керамічного інструмента [12]

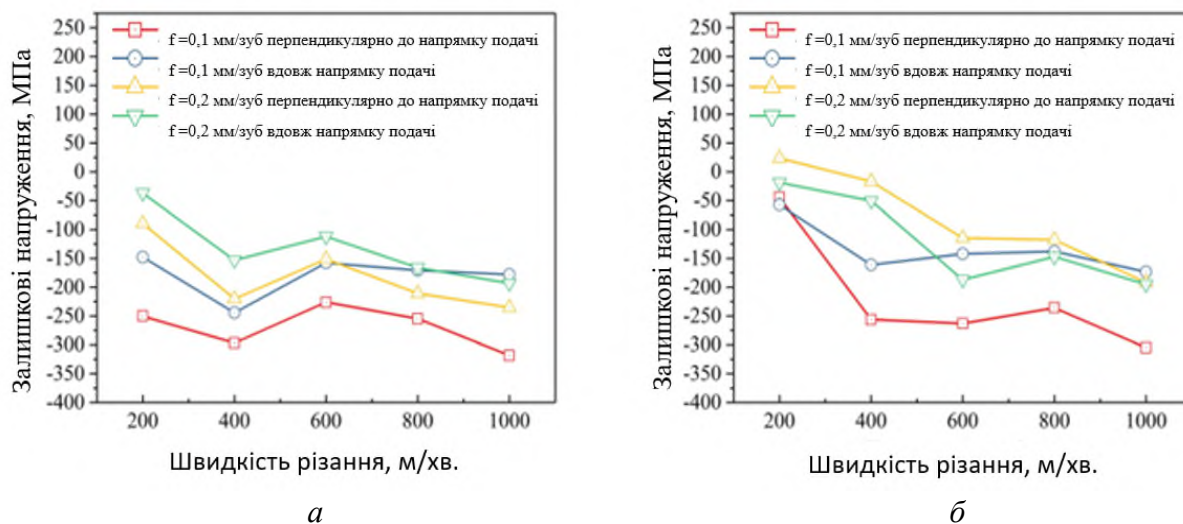


Рис. 2. Залишкові напруження при використанні твердосплавного інструменту (а), керамічного інструмента (б) [12]

Залежності, отримані в роботі [13], показують взаємозв'язок між режимами й умовами обробки та силами різання і залишковими напруженнями при торцевому фрезеруванні сірого чавуну, чавуну з вермикулярним графітом та чавуну з кулястим графітом твердосплавом з покриттям. При сухому різанні високі швидкості та подачі викликають збільшення сил різання та зміну розподілу залишкових напружень

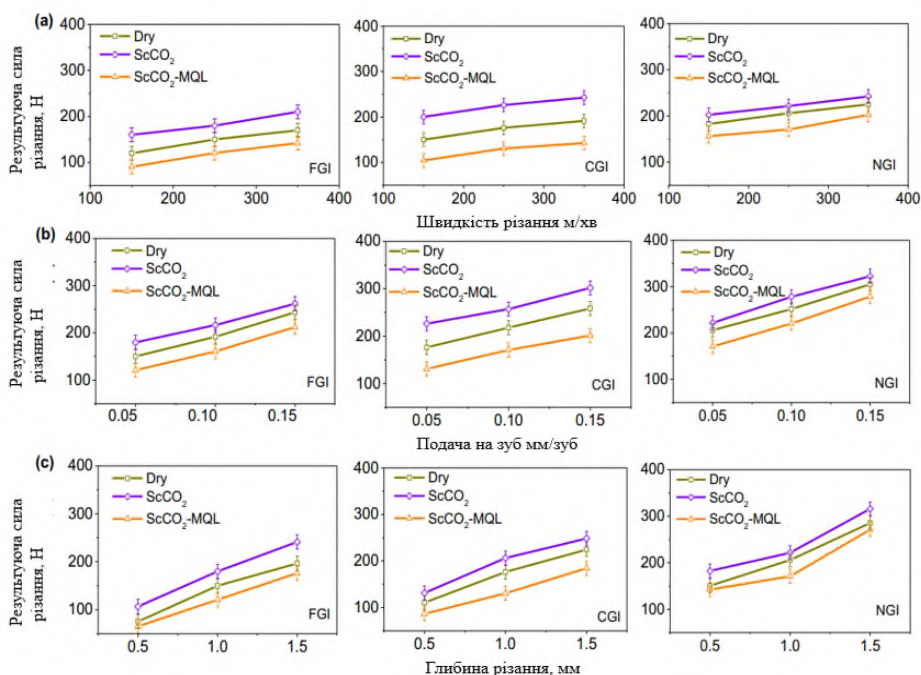


Рис. 3. Залежності результуючої сили різання від швидкості різання, подачі та глибини при торцевому фрезеруванні твердосплавом із покриттям:
 а – сірого чавуну; б – чавуну з вермикулярним графітом;
 с – чавуну з кулястим графітом [13]

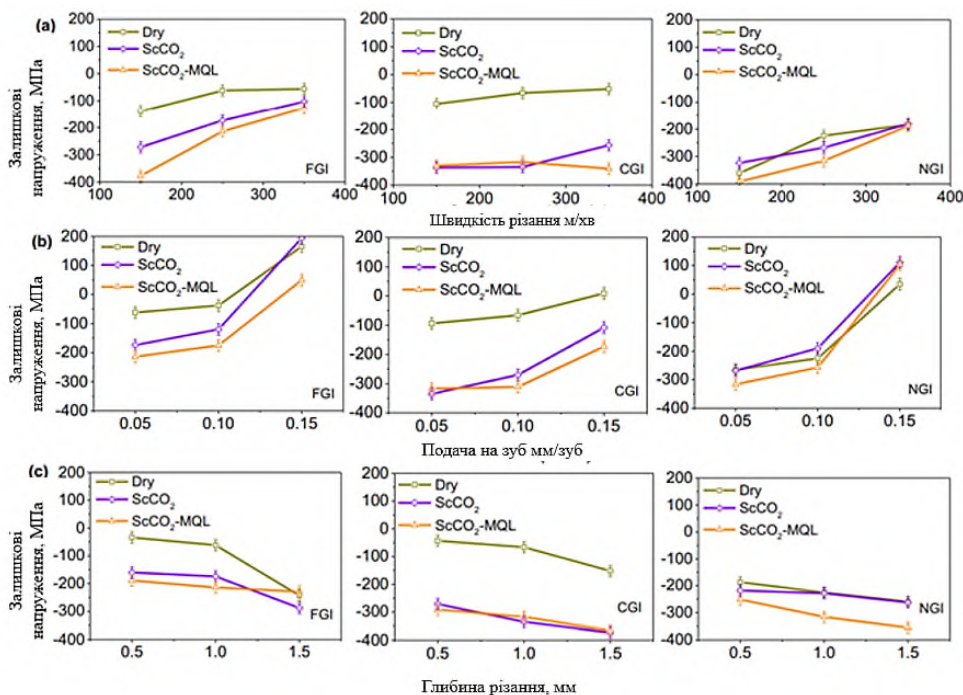


Рис. 4. Залежності залишкових напружень від швидкості різання, подачі та глибини при торцевому фрезеруванні твердосплавом з покриттям:
 а – сірого чавуну; б – чавуну з вермикулярним графітом;
 с – чавуну з кулястим графітом [13]

Використання охолоджуючої рідини ScCO₂-MQL сприяло формуванню стискаючих залишкових напружень. Контроль температури і сили різання за допомогою використання охолоджуючої рідини мінімізує шорсткість поверхні, забезпечуючи високу якість обробки навіть при підвищені подачі. Це свідчить про те, що термічні й механічні фактори мають бути враховані в комплексі для оптимізації процесу фрезерування.

У роботі [11] науковці дослідили залежність залишкових напружень від режимів різання та кореляцію з силами різання. Дослідники [11] повідомили, що вплив подачі на залишкові напруження у поверхневому шарі деталей з чавуну з вермикулярним графітом (CGI) є більш значущим, ніж вплив швидкості різання. При зростанні швидкості різання та подачі виникали залишкові напруження розтягу, які зростали від +111 до +283 МПа. Також вони показали, що залишкові напруження можуть бути передбачені шляхом аналізу значень тангенціальної сили, потужності та активної роботи. Вони визначають механічну енергію в процесах фрезерування. Ці передбачення допомагають уникати сильних розтягуючих напружень, які можуть призвести до передчасного утворення тріщин або зниження довговічності деталі.

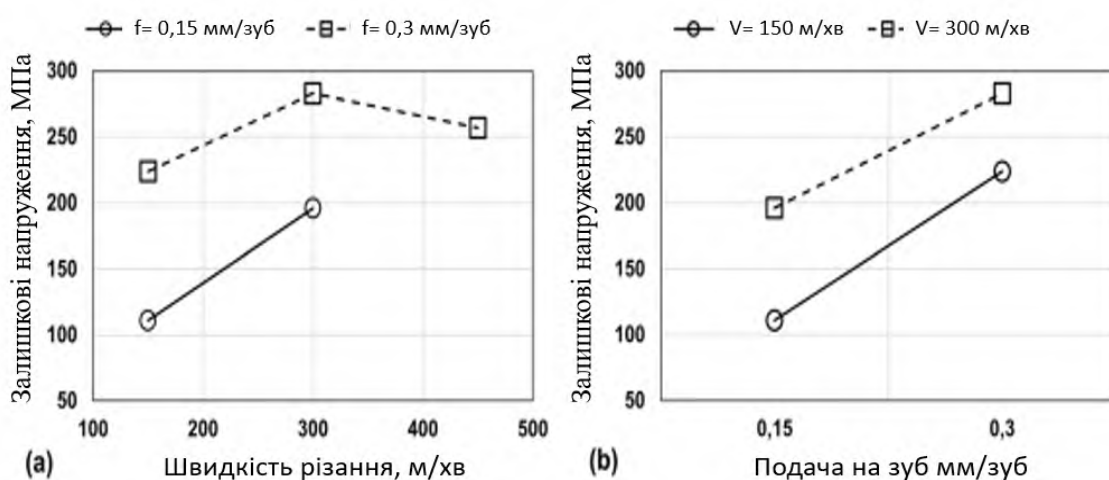


Рис. 5. Вплив швидкості різання і подачі на залишкові напруження при фрезеруванні чавуну з вермикулярним графітом [11]

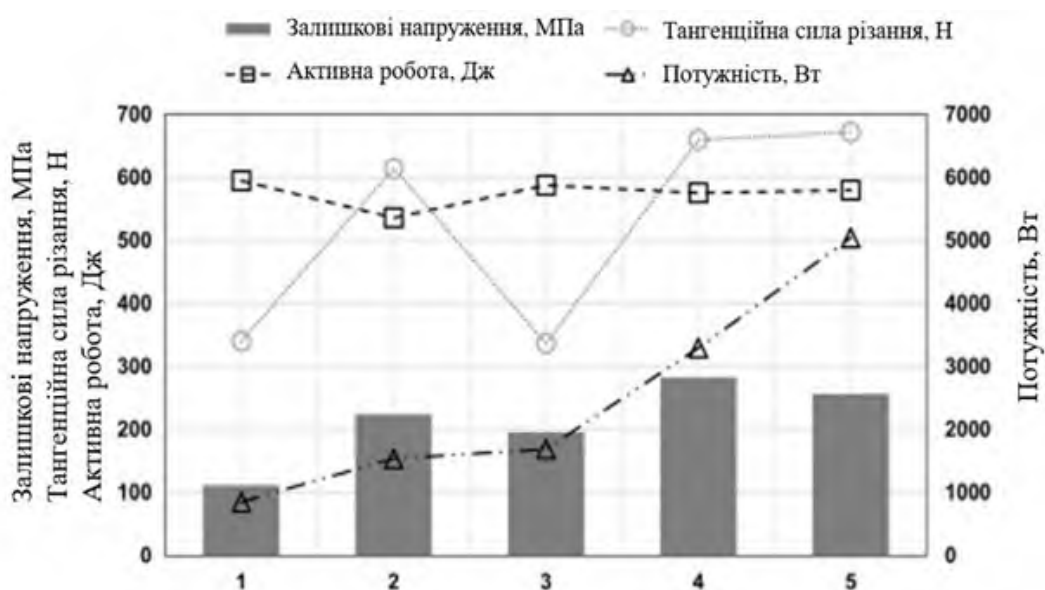


Рис. 6. Вплив тангенціальної сили різання, потужності та активної роботи на залишкові напруження при фрезеруванні чавуну з вермикулярним графітом [11].

На характер і рівень залишкових напружень також впливає геометрія різального інструмента [1]. У процесі різання геометрія різального інструмента змінюється, що призводить до нестабільного розподілу навантаження в зоні обробки. Це, у свою чергу, підвищує ризик утворення небажаних залишкових напружень [4]. У роботі [14] автори дослідили як впливає зношування на внутрішні напруження в поверхневому шарі і проаналізували вплив зносу задньої поверхні ($V_b = 0,03$ мм та $V_b = 0,26$ мм) на залишкові напруження, досліджуючи різну глибину поверхневого шару. Для поверхневого шару (0–20 мкм) в обох випадках V_b залишкові напруження позитивні (розтягуючі), але їх величина значно вища при $V_b = 0,26$ мм (120 МПа). У міру збільшення зносу інструмента по задній поверхні значно зростають розтягуючі залишкові напружень у поверхневому шарі на фоні посилення тертя між інструментом і деталлю. Для глибини в межах 20–40 мкм розтягуючі напруження змінюються на стискаючі, досягаючи мінімуму (-80 МПа) при $V_b = 0,26$ мм. При $V_b = 0,03$ мм стискаючі напруження менш виражені, але все ще присутні (-60 МПа). На глибинах в діапазоні (40–100 мкм) напруження поступово повертаються до нейтрального стану (близько 0 МПа). При $V_b = 0,26$ мм спостерігається значне коливання значень у напруженнях. Для $V_b = 0,03$ мм характер зміни напружень більш стабільний. Збільшення зносу по задній поверхні інструмента (V_b) інтенсифікує термічний і механічний вплив на поверхневий шар, сприяючи виникненню значних розтягуючих напружень в поверхневих шарах оброблених поверхонь. Для забезпечення стабільності обробки, утворення стискаючих залишкових напружень і зменшення негативного впливу на якість обробленої поверхні необхідно мінімізувати знос інструмента, використовуючи відповідні режими обробки та інструменти з підвищеною зносостійкістю.

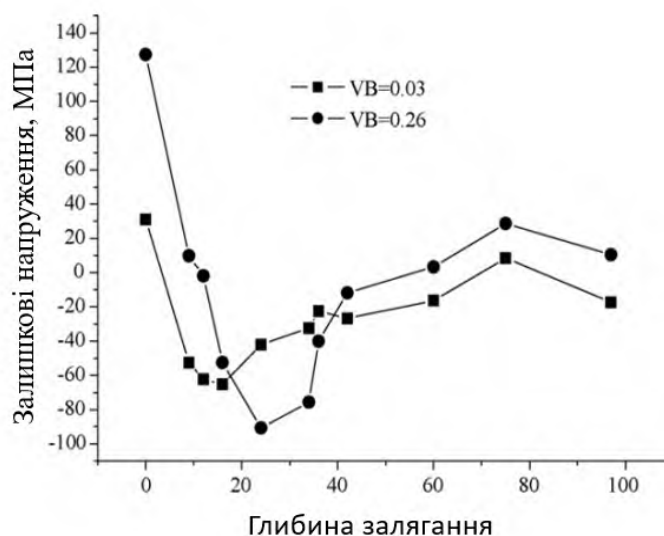


Рис. 7. Вплив зношування на внутрішні залишкові напруження [14]

Висновок. Відповідно до проведеного аналітичного аналізу, залишкові напруження, які утворюються під час торцевого фрезерування залежать від швидкості різання, подачі та зносу інструменту. При середніх швидкостях різання (600–800 м/хв) та низькій подачі (0,1 мм/зуб) формуються стискаючі напруження. Розтягуючі напруження виникають при низьких швидкостях, високій подачі або значному зносі інструменту. Для покращення якості поверхні рекомендується оптимізувати режими різання та забезпечувати регулярну заміну інструменту.

Список використаних джерел

1. Withers, P. J. Residual stress. Part 1 – Measurement techniques / P. J. Withers, Bhadeshia, H. K. D. H. // Materials Science and Technology. – 2001. – Vol. 17(4). – Pp. 355-365. DOI: <https://doi.org/10.1179/026708301101509980>.

2. Мельничук П. П. Наукові основи чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь : дис... д-ра техн. наук : 05.03.01 / П. П. Мельничук; Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». – Київ, 2002. – 456 с.
3. Технології механообробки інструментами з надтвердих матеріалів і твердих сплавів у ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України / М. В. Новіков, В. О. Шепелев, С. А. Клименко, В. І. Лаврінченко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2005. – Вип. 2. – С. 91-101.
4. Kalpakjian, S. *Manufacturing Engineering and Technology* / S. Kalpakjian, S. R. Schmid. – 7th SI Edition. – Publisher: Pearson Publications, Singapore, 2014. – 1216 p.
5. Residual stress generation and evaluation in milling: a review / Xiaohui Jiang [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11394-1>.
6. Predictive modelling of microstructure changes, micro-hardness and residual stress in machining of 304 austenitic stainless steel / Wenqian Zhang [et al.] // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2018. – Vol. 130-131. – Pp. 36-48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.03.008>.
7. Schulze V. *Modern Mechanical Surface Treatment: States, Stability, Effects* / Volker Schulze. – [S. l.] : Wiley & Sons, Limited, John, 2006. – 375 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/3527607811>.
8. Mohsen Soori. A Review in Machining-Induced Residual Stress [Electronic resource] / Mohsen Soori, Behrooz Arezoo // *Journal of New Technology and Materials*. – 2022. – Vol. 12 (1). – Pp. 64-83. – Mode of access: <https://hal.science/hal-03679993/document>
9. Утворення залишкових напружень та їх залежність від технологічних параметрів процесу механічної обробки деталей / Я. О. Шахбазов, В. В. Широков, І. М. Грінер, В. А. Сторощук // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2017. – № 867. – С. 56-59.
10. Yang Y. Development of a Method to Measure Residual Stresses in Cast Components with Complex Geometries [Electronic resource] / Y. Yang. – KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2020. – 120 с. – Mode of access: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1392856/FULLTEXT03.pdf>.
11. Kara M. E. Investigation of Residual Stresses Induced by Milling of Compacted Graphite Iron by x-ray Diffraction Technique / Mehmet Emre Kara, Ali Taner Kuzu, Mustafa Bakkal // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08904-3>.
12. Study on surface integrity of compacted graphite iron milled by cemented carbide tools and ceramic tools / Jiahui Niu [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 103, №. 9-12. – Pp. 4123-4134. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03592-7>.
13. Machinability improvement of compacted graphite irons in milling process with supercritical CO₂-based MQL / Luqiang Tu [et al.] // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 68. – Pp. 154-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.044>.
14. The influence of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy / Z. T. Tang [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – Vol. 209, №. 9. – Pp. 4502-4508. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.10.034>.
15. The effect of head hardening process on the residual stress of rails / Muhammet E. Turan [et al.] // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. / Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2016. – Vol. 232, №. 2. – Pp. 589-595. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409716679450>.
16. Recent advances in residual stress measurement / P. J. Withers [et al.] // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2008. – Vol. 85, no. 3. – Pp. 118–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2007.10.007>.
17. Dronavalli S. Residual stress measurements and analysis by destructive and non-destructive techniques [Electronic resource] : master's thesis / Dronavalli S. – Las Vegas, 2004. – 46 p. DOI: <https://digitalscholarship.unlv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2681&context=rtds>.

References

1. Withers, P.J., & Bhadeshia, H.K.D.H. (2001). Residual stress. Part 1 – Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, 17(4), 355–365. <https://doi.org/10.1179/026708301101509980>.
2. Melnychuk, P.P. (2002). Naukovi osnovy chystovoho tortsevoho frezeruvannya ploskykh poverkhon [Scientific bases of finishing face milling of flat surfaces]. *Doctor's thesis*.

3. Novikov, M.V., Shepelyev, V.O., Klymenko, S.A., Lavrinenko, V.I. (2005). Tekhnolohiyi mekhanobrobky instrumentamy z nadtverdykh materialiv i tverdykh splaviv u INM im. V.M. Bakulya NAN Ukrainy [Technologies of machining with tools from superhard materials and hard alloys in the V. Bakul Institute for Superhard Materials]. *Protsesty mekhanichnoyi obrobky v mashynobuduvanni – Machining processes in mechanical engineering*, 2, 91–101.
4. Kalpakjian, S., & Schmid, S.R. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology* (7th SI Edition). Pearson.
5. Jiang, X., Wei, Y., Zhou, J., Zhan, K., Ding, Z., & Liang, S. Y. (2023). Residual stress generation and evaluation in milling: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(9–10), 3783–3812. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11394-1>.
6. Zhang, W., Wang, X., Hu, Y., Wang, S. (2018). Predictive modelling of microstructure changes, micro-hardness and residual stress in machining of 304 austenitic stainless steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 130, 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.03.008>.
7. Schulze, V. (2005). *Modern Mechanical Surface Treatment: States, Stability, Effects*. Wiley-VCH. <https://doi.org/10.1002/3527607811>.
8. Soori, M., Arezoo, B. (2022). A Review in Machining-Induced Residual Stress. *Journal of New Technology and Materials*, 12(1), 64-83. <https://hal.science/hal-03679993/document>.
9. Shakhbazov, Ya.O., Shyrokov, V.V., Hriner, I.M., Storoshchuk, V.A. (2017). Utvorenniya zalyshkovykh napruzhen ta yikh zalezhnist vid tekhnolohichnykh parametriv protsesu mekhanichnoyi obrobky detaley [Formation of residual stresses and their dependence on the technological parameters of the process of machining parts]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Optymizatsiya vyrobnychykh protsesiv i tekhnichnyy kontrolu mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni – Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Optimisation of production processes and technical control in mechanical engineering and instrumentation*, 867, 56-59.
10. Yang, Y. (2020). Development of a Method to Measure Residual Stresses in Cast Components with Complex Geometries. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1392856/FULLTEXT03.pdf>.
11. Kara, M.E., Kuzu, A.T., Bakka, M. (2024). Investigation of Residual Stresses Induced by Milling of Compacted Graphite Iron by X-ray Diffraction Technique. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 33, 3801–3810. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08904-3>.
12. Niu, J., Huang, C., Su, R., Zou, B., Wang, J., Liu, Z., Li, C. (2019). Study on surface integrity of compacted graphite iron milled by cemented carbide tools and ceramic tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(9-12), 4123-4134. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03592-7>.
13. Tu, L., Chen, J., An, Q., Ming, W., Xu, J., Chen, M., Lin, L., Yang, Z. (2021). Machinability improvement of compacted graphite irons in milling process with supercritical CO₂-based MQL. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 154–168. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.044>.
14. Tang, Z. T., Liu, Z. Q., Pan, Y. Z., Wan, Y., Ai, X. (2009). The influence of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(9), 4502-4508. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.10.034>.
15. Turan, M.E., Ozcelik, S., Husem, F., Ahlatci, H., Sun, Y., Tozlu, I. (2018). The Effect of Head Hardening Process on the Residual Stress of Rails. *Proc. I. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 232(2), 589–595. <https://doi.org/10.1177/0954409716679450>.
16. Withers, P.J., Turski, M., Edwards, L., Bouchard, P.J., Buttle, D.J. (2008). Recent Advances in Residual Stress Measurement. *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, 85(3), 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2007.10.007>.
17. Dronavalli S.B. (2004). Residual Stress Measurements and Analysis by Destructive and Non-Destructive Techniques. *Master's thesis*. University of Nevada, Reno. <https://digitalscholarship.unlv.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2681&context=rtds>.

Отримано 11.11.2024

Svitlana Radkevych¹, Ihor Lutsiv²¹PhD student of the Mechanical Engineering Department

State University "Zhytomyr Polytechnic" (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: asp_rsi@student.ztu.edu.ua. **ORCID**<https://orcid.org/0000-0002-8791-1653>²Doctor of Technical Sciences, Professor of the Mechanical Engineering Department

State University "Zhytomyr Polytechnic" (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: kmi_liv@ztu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3980-428X>**DEPENDENCE OF RESIDUAL STRESSES IN THE WORKPIECE SURFACE ON CUTTING CONDITIONS DURING FACE MILLING**

Presented in the article information is an overview. It discusses residual stresses occurred in the surface during face milling.

Face milling is one of the most effective machining processes that provides high accuracy and quality of flat surfaces of products. However, this process is accompanied by the occurrence of internal residual stresses. They can be either compressive or tensile. Tensile stresses can negatively affect the performance of products and should be avoided. This article presents an analysis of research results that describe the mechanisms of formation and prediction of residual stresses during milling, as well as methods for their detection and other auxiliary control methods.

An analysis of recent research and publications has shown that the mechanism of residual stress formation and its level during face milling depends on many factors, such as the type of tool material, cutting modes, and material properties of the workpiece. However, the influence of the interaction of these factors, the nature of residual stresses in the material microstructure, and ways to effectively manage them to ensure the desired characteristics of finished products remain insufficiently studied.

The purpose of the article is to study the mechanisms of internal stress formation and their level as a result of face milling of flat surfaces.

It has been established that for most tool materials, tensile residual stresses are formed at low cutting speeds at high cutting forces. At medium cutting speeds, maximum cutting forces increase the plastic deformation, contributing to the formation of compressive residual stresses in deeper layers, but can increase the risk of surface damage. At high cutting speeds, a decrease in residual stresses was found and they moved to a neutral state. Increasing the feed rate resulted in higher forces and, as a result, tensile residual stresses. Tool wear increased the force. As a result, the resulting residual stresses changed from compressive to tensile, which increased as the tool wore.

Keywords: face milling; residual stresses; flat surfaces; cutting forces; wear; surface layer.

Fig.: 7. **References:** 17.

**Антон Едуардович Щербань¹, Вячеслав Володимирович Вовк²,
Сергій Володимирович Майданюк³, Юрій Йосипович Бесарабець⁴**

¹ студент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)
E-mail: anton619ton@gmail.com

² кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)
E-mail: 010479@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5122-6198>. ResearcherID: [H-9328-2017](https://orcid.org/0000-0001-5122-6198)

³ кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)
E-mail: maysv3@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2853-8606>. ResearcherID: [J-7542-2017](https://orcid.org/0000-0003-2853-8606)

⁴ кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)
E-mail: york.bessar@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0773-099X>

СПРОЩЕННЯ ПРИ АНАЛІЗІ СКЛАДАЛЬНИХ ОДИНИЦЬ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ РОБОТИ З НИМИ

Представлена у статті інформація має навчально-методичний характер. У сучасному машинобудуванні виникає необхідність роботи зі складальними одиницями з великою кількістю деталей, де їх кількість може перевищувати сотні. Такий обсяг створює труднощі при аналізі міцності, оптимізації створення та внесення змін до конструкторської документації, підготовці допоміжних файлів для виробництва. У роботі наведено підходи, які дозволили пришвидшити аналіз великих складальних одиниць, підвищити ефективність роботи з конструкторською документацією та допоміжними файлами на прикладі рами, виконаної в середовищі Autodesk Inventor 2024. Досягнуто значного скорочення часу аналізу складальних одиниць, які в основному складаються з листових деталей, методом скінченних елементів, а також створення документації, включаючи DXF-файли для листових деталей. Суттєво скорочується час на рутинні задачі та зменшується кількість помилок, спричинених людським фактором.

Ключові слова: CAD; Inventor; машинобудування; автоматизація; оптимізація; складальні одиниці; збірки.
Рис.: 3. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. При вирішенні сучасних завдань у галузі машинобудування часто необхідно працювати не лише з окремими деталями, але й зі складальними одиницями з великою кількістю деталей. Робота з подібними складальними одиницями в CAD середовищі має свою специфіку та потребує особливих підходів, які не завжди є очевидними.

Постановка проблеми. При роботі з великими за кількістю елементів складальними одиницями, кількість деталей у яких перевищує декілька сотень, постають проблеми, наприклад: як досліджувати та проводити аналіз, як оптимізувати випуск документації, як спростити створення допоміжних файлів для виробництва. Якщо правильно обрати підходи до роботи з такими складальними одиницями, можна спростити та прискорити їх аналіз, автоматизувати вирішення монотонних задач, щоб уникнути непотрібних помилок. Це не тільки покращить продуктивність конструкторської роботи, але й допоможе вберегти від впливу людського фактору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вирішення зазначених проблем було проаналізовано роботи за даною тематикою [1; 2; 3; 4; 5; 6]. У роботі [2] показано підхід до застосування API інтерфейсу, його можливості для пришвидшення створення елементів моделей. Такий підхід може бути використаний для вирішення поставлених проблем, оскільки він дає змогу керувати всіма параметрами та властивостями моделей та файлів. У статті [3] наведено приклад застосування iLogic для автоматизації випуску конструкторської документації певного типу деталей. Ця стаття показує, як можна автоматизувати рутинні операції, використовуючи шаблони та правила в Autodesk Inventor. Інші джерела [1; 4; 5; 6], у яких розглянуті приклади застосування API інтерфейсу та автоматизації при вирішенні різнопланових завдань, показують додаткові можливості сучасних CAD систем та переваги їх використання для вирішення таких задач.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Більшість підходів для прискорення роботи при моделюванні присвячені правильному алгоритму побудови моделей, швидкій взаємодії з інтерфейсом, використанню та налаштуванню параметризації. І, звісно, це є основою для стабільної та швидкої роботи, однак сучасні CAD програми мають функціонал, яким багато хто просто не користується. Програми дозволяють не лише використовувати стандартні функції, а і створювати їх самостійно, залежно від поставленої задачі та необхідності.

Метою статті є показати можливості та ефективність застосування підходів з використання API інтерфейсу та спрощення аналізу складальних одиниць для підвищення продуктивності конструкторської роботи та мінімізації кількості помилок.

Виклад основного матеріалу. Робота інженера конструктора складається з регулярного вирішення задач проектування, параметризації, аналізу, розробки конструкторської документації, створення допоміжних файлів для складальних одиниць та деталей. Однак при роботі з великими за кількістю деталей складальними одиницями виникають проблеми. Файлів, з якими необхідно працювати, можуть бути сотні, при подібних об'ємах даних звичайні, на перший погляд, прості рутинні операції можуть займати десятки годин роботи та відволікати конструктора безпосередньо від процесу проектування. Також при обробці великої кількості файлів збільшується шанс конструктора зробити помилку, що може призвести до непередбачуваних наслідків. Тому для уникнення проблем та підвищення продуктивності роботи конструктора необхідно застосовувати певні підходи при роботі зі складальними одиницями з великою кількістю деталей. На прикладі реалізації реального завдання по розробці складальної одиниці рами жатки комбайна (рис. 1) розглянемо, які підходи були застосовані для вирішення зазначених задач.

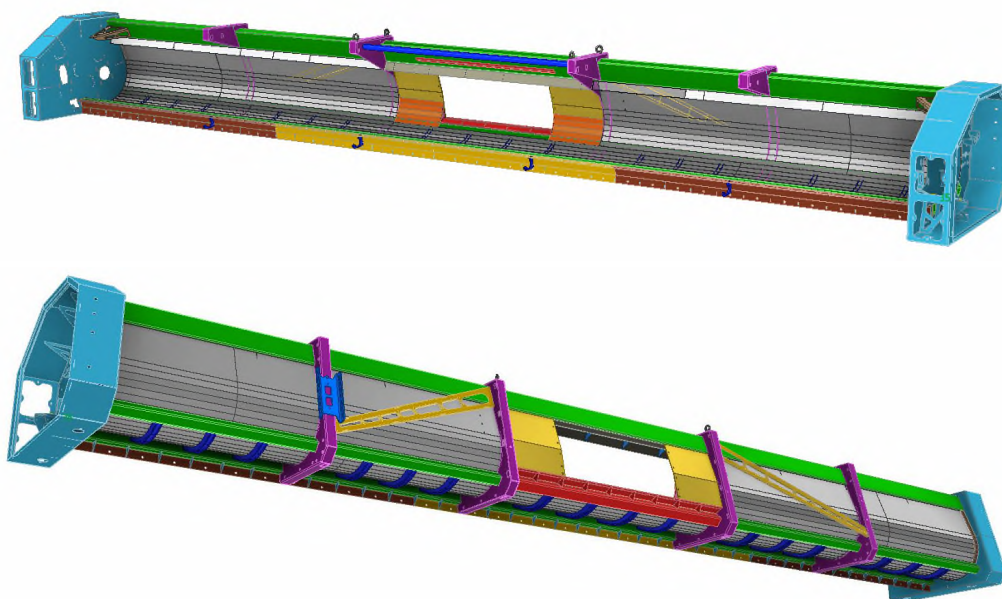


Рис. 1. Будова рами

Всі роботи виконувались в середовищі Autodesk Inventor 2024, але запропоновані методи та підходи можна застосувати й в інших CAD програмах. Однією із перших проблем при роботі з даною складальною одиницею є складність її аналізу на міцність методом скінченних елементів. Складальна одиниця рами має близько 150 деталей, причому різного габариту. При проведенні аналізу подібної складальної одиниці можна зіткнутися з недостатністю обчислювальних можливостей комп'ютера. Є декілька варіантів вирішення цієї проблеми. Можна провести розрахунок на більш потужному комп'ютері або за допомогою хмарних сервісів.

Наступним варіантом є аналіз окремих частин складальної одиниці, за результатами якого можна зробити висновки про загальну конструкцію. Цей метод здебільшого використовується для симетричних конструкцій, на які діють симетричні навантаження. У таких випадках достатньо провести аналіз лише однієї симетричної частини, а отримані результати поширити на іншу частину складальної одиниці. Однак рама, яка розглядається, не є симетричною, тому цей метод для цього випадку не є актуальним. Також при аналізі частин складальної одиниці не враховується взаємодія компонентів один між одним та значно ускладнюється процес правильного налаштування аналізу.

Тому для проведення аналізу великої складальної одиниці, її потрібно підготувати та спростити для полегшення розрахунку. Потрібно створити окрему, спрощену складальну одиницю для аналізу, з якої слід вилучити всі дрібні деталі та елементи на деталях, які не будуть впливати на результати розрахунку. Наприклад, отвори на деталях, які не сприймають навантаження. Подібні дії дозволяють сформувати простішу сітку для аналізу методом скінченних елементів, а відсутність дрібних елементів та деталей дозволить створити більш грубу та просту сітку, що значно вплине на швидкість аналізу.

Якщо складальна одиниця відповідає певним вимогам, наприклад, у більшості складається з листових деталей або є фермою, то сучасні CAD програми, що мають модуль аналізу, дозволяють значно спростити подібні збірки для розрахунку. Ця збірка рами на 95 % складається з листових деталей, що дає можливість скористатися методом заміни твердотільних елементів на поверхні, який доступний у модулі аналізу напружень Autodesk Inventor. Приклад такої заміни листових елементів рами представлений на рис. 2.

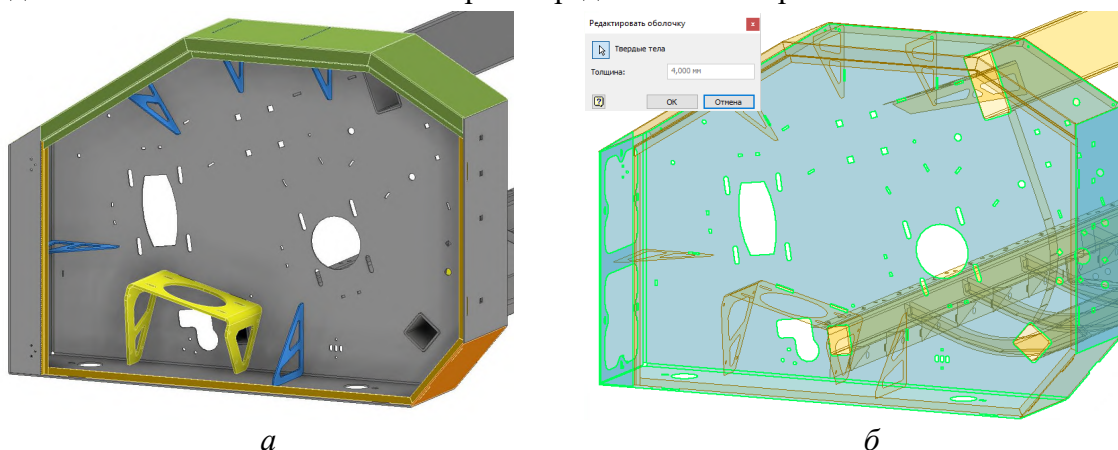


Рис. 2. Зображення фрагмента складальної одиниці до заміни (а), після заміни (б) твердотільних елементів на еквівалентні їм поверхні

Цей метод дозволяє суттєво зменшити час на розрахунок, що значно знижує вимоги до потужностей комп'ютера для проведення розрахунку. Здебільшого це пов'язано з тим, що метод прибирає з розрахунку одну з просторових координат для перерізу, що теоретично скорочує розрахунок на 30 %. Також такий підхід дозволяє використовувати більш грубу сітку. Якщо деталь є тонкостінною, де товщини стінки відноситься до габаритів деталі як $1/100$, або менше, то цей метод дає результати, які рівні результатам аналізу твердотільних елементів, приклад такого порівняння показано на рис. 3. Є невеликі відмінності в результатах аналізу, пов'язані з концентраторами напружень на гранях листової деталі, але в інших місцях деталі результати аналізу співвідносяться коректно.

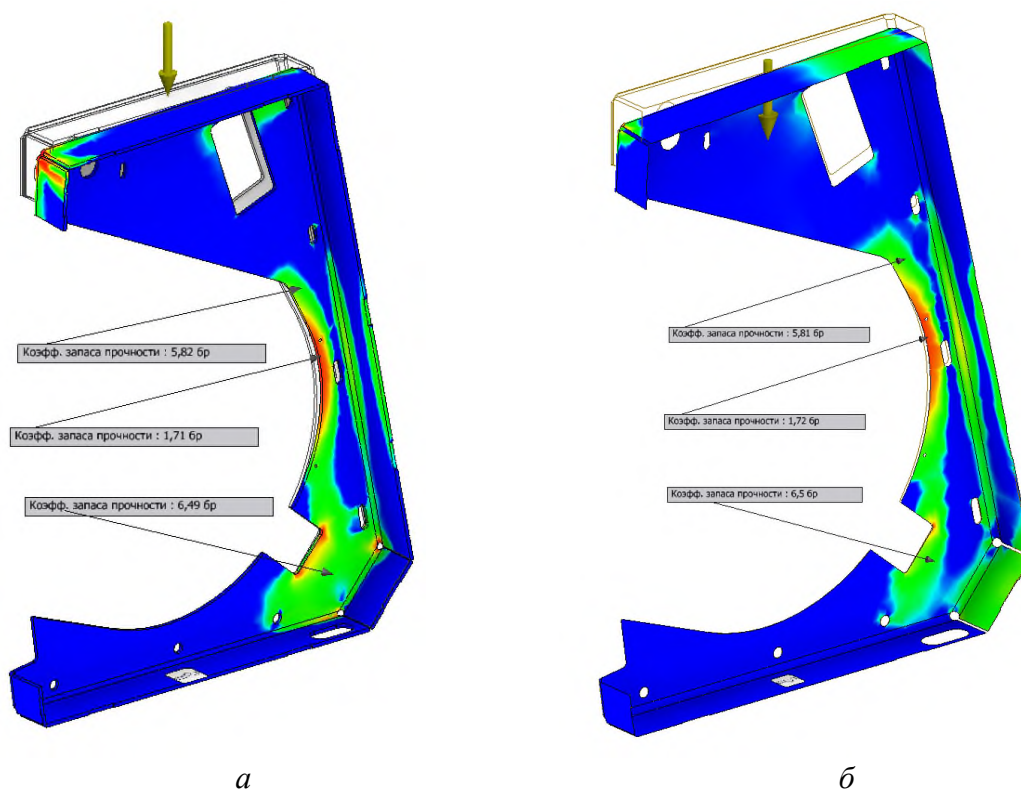


Рис. 3. Порівняння результатів аналізу до заміни твердого (а) та еквівалентної йому поверхні (б)

Оскільки максимальний розмір сітки залежить від мінімального розміру елемента деталі, а у випадку листових деталей це здебільшого товщина листа, прибираючи її ми знімаємо обмеження на максимальний розмір елемента сітки. На рис. 4 показано складальну одиницю в середовищі аналізу напружень після заміни твердотільних деталей на еквівалентні їм поверхні. До новостворених поверхонь прикладаються робочі зусилля та накладаються взаємозв'язки.

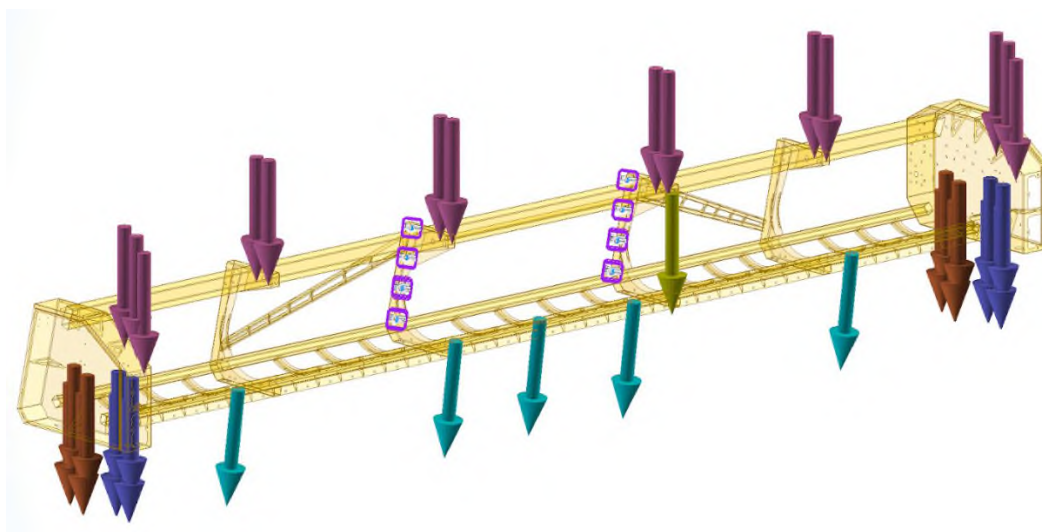


Рис. 4. Аналіз складальної одиниці після заміни

У результаті проведення аналізу розраховано напруження та деформації елементів складальної одиниці як приклад на рис. 5 показано розподіл коефіцієнта запасу міцності в конструкції.

Наступним етапом є автоматизація процесу випуску документації та додаткових файлів для виробництва.

Для цієї складальної одиниці, яка складається переважно з листових деталей, виникає необхідність в автоматизації створення DXF файлів розгортки деталей, які необхідні для процесу розкрою листового матеріалу. Оскільки вся необхідна інформація, наприклад позначення та опис деталі, товщина листового матеріалу, вид матеріалу, кількість деталей, уже міститься у властивостях файлу деталі або складальної одиниці, необхідно лише знайти спосіб, як правильно інтегрувати ці дані в DXF файли.

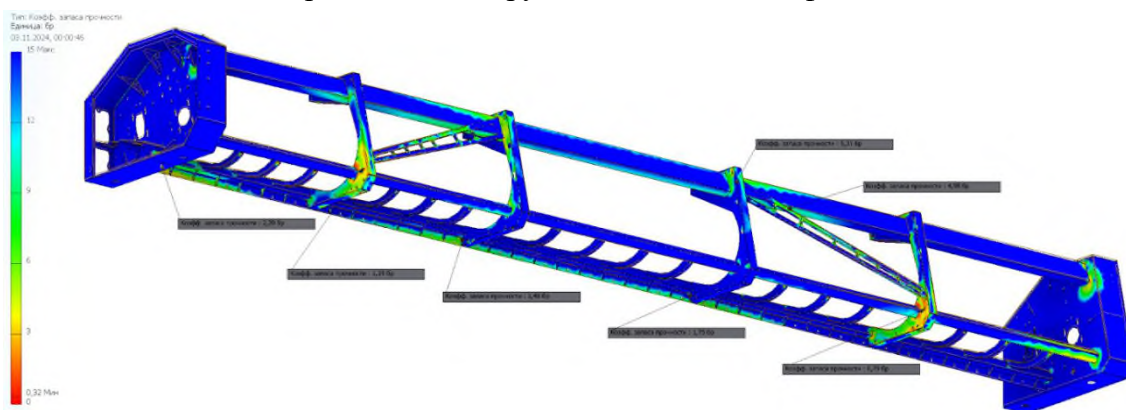


Рис. 5. Результати аналізу складальної одиниці

Сучасні CAD програми дозволяють програмувати власні сценарії взаємодії з програмою та інтерфейсом, в Inventor цей функціонал доступний за допомогою iLogic. Він дає можливість створювати та зберігати файли, та має доступ до всіх властивостей моделі. iLogic дає можливість створити правило, яке запускається із загальної складальної одиниці проекту, дозволяє автоматично знайти всі листові деталі, створити для них розгортки, дати файлам розгортки необхідні назви, наприклад: “ <позначення деталі> - <товщина листа>, <кількість деталей>”; та зберегти створені DXF файли в різні папки, залежно від необхідних параметрів, наприклад товщини, позначення тощо. Інтерфейс iLogic та частину подібного правила показано на рис. 6. Подібний функціонал не тільки зекономить десятки годин при роботі з об’ємними складальними одиницями, а і зменшить навантаження на інженера та кількість помилок при формуванні файлів, оскільки йому не потрібно буде відволікатися на рутинні процеси.

На прикладі такої складальної одиниці на один файл при ручному збереженні необхідно близько 1 хвилини, а на формування пакета DXF файлів такої складальної одиниці рами необхідно витратити 1,5...2,0 години. Використання додаткових правил дозволяє скоротити час до 2...3 секунди на один файл і загалом до 3 хвилин на весь пакет DXF файлів. Тобто час скорочується в десятки разів і ймовірність допущення помилки при автоматичному методі наближується до нуля.

Схожий функціонал можна реалізувати і для формування конструкторської документації. Наприклад, за допомогою iLogic можна аналогічно налаштувати експорт креслеників у PDF-формат, із необхідним розбиттям по папках. Звісно функціонал iLogic набагато більший, але для оптимальної роботи було достатньо саме такого функціоналу.

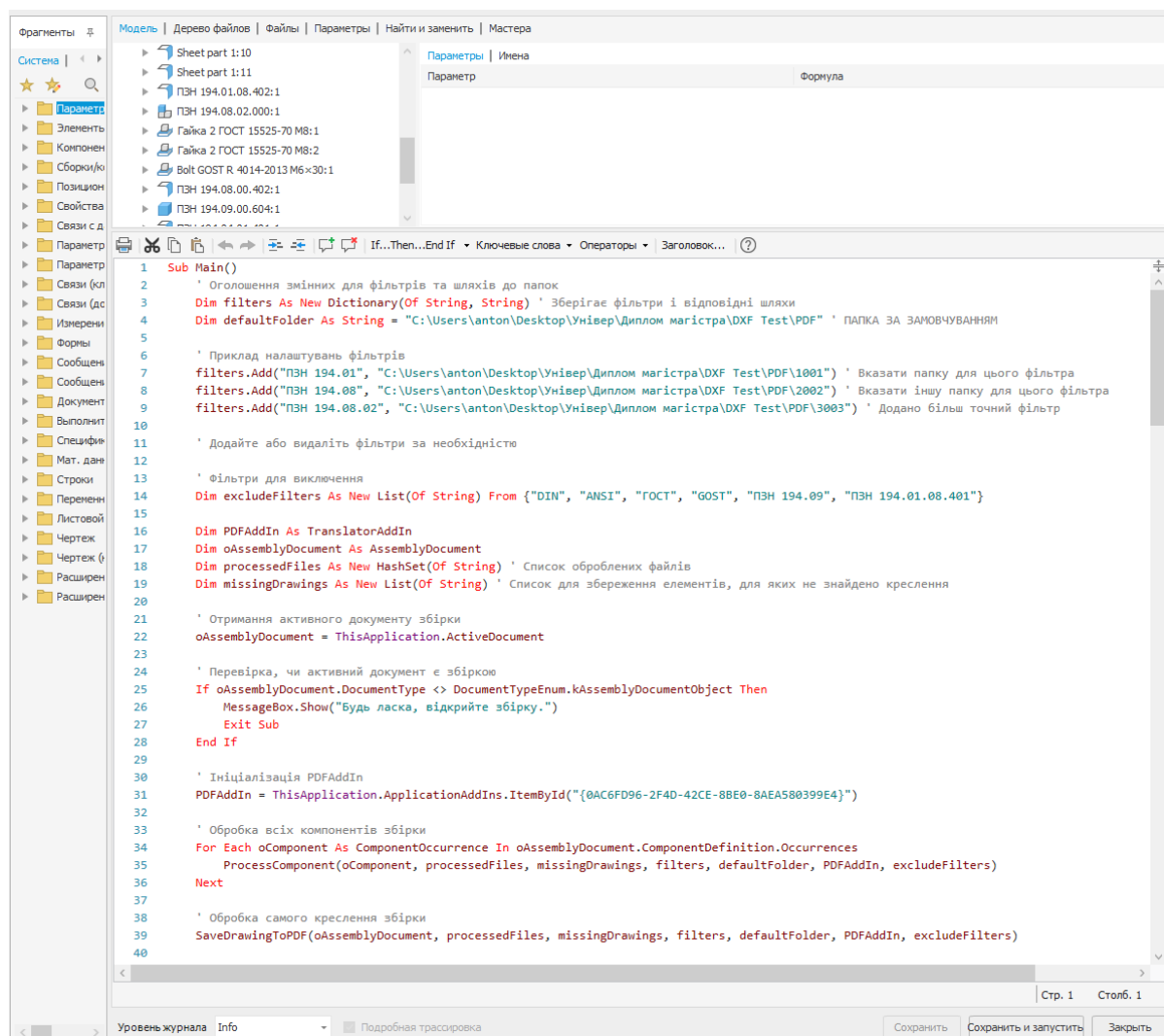


Рис. 6. Інтерфейс середовища iLogic з частиною правила

Висновки. У роботі запропоновані та описані підходи для роботи з великими складальними одиницями. На реальних прикладах показані переваги налаштування робочого середовища під конкретні задачі. Застосування цих підходів дозволило скоротити в десятки разів час на створення допоміжних файлів та публікацію конструкторської документації зі зниженням ймовірності допущення помилок.

Список використаних джерел

1. Автоматизація оформлення конструкторської документації пружин розтягання в пакеті Autodesk Inventor / Є. М. Іванов, О. С. Алефіров, М. В. Куліш, В. В. Овсянніков // Сучасні проблеми моделювання. – 2021. – Вип. 23. – С. 90-97. DOI: <https://doi.org/10.33842/2313-125x-2023-23-90-97>
2. Черніков, О. В. Особливості автоматизації процесів моделювання в пакеті Autodesk Inventor / О. В. Черніков, Н. Є. Калужна, А. Ламдаїні // Прикладні питання математичного моделювання. – 2021. – Т. 4, № 2.1. – С. 261-268. DOI: <https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2021.4.2.1.28>.
3. Flexible and robust CAD models for design automation / K. Amadori, M. Tarkian, J. Ölvander, P. Krus // Advanced Engineering Informatics. – 2012. – Vol. 26, № 2. – Pp. 180-195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.01.004>.
4. Kreis, A. CAD-Automation in Automotive Development – Potentials, Limits and Challenges / A. Kreis, M. Hirz, P. Rossbacher // Computer-Aided Design and Applications. – 2020. – Vol. 18, № 4. – Pp. 849-863. DOI: <https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.849-863>.

5. McLoughlin, I. Management, Work Organisation and Cad - Towards Flexible Automation? / I. McLoughlin // *Work, Employment and Society*. – 1990. – Т. 4, № 2. – Pp. 217-237. DOI: <https://doi.org/10.1177/0950017090004002003>

6. Moreno, R. Automation in the Teaching of Descriptive Geometry and CAD. High-Level CAD Templates Using Script Languages / R. Moreno, A. M. Bazán // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Т. 245. – Pp. 062040. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/245/6/062040>.

References

1. Amadori, K., Tarkian, M., Ölvander, J., & Krus, P. (2012). Flexible and robust CAD models for design automation. *Advanced Engineering Informatics*, 26(2), 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.01.004>.

2. Chernikov, O. V., Kaliuzhnaya, N. Y., & Lamdaini, A. (2021). Features of automation of modeling processes in the autodesk inventor package. *Applied Questions of Mathematical Modeling*, 4(2.1). <https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2021.4.2.1.28>.

3. Ivanov, E., Alefirov, O., Kulish, M., & Ovsyannikov, V. (2022). Automation of design documentation of tension springs in the autodesk inventor package. *Modern Problems of Modeling*, (23), 90-97. <https://doi.org/10.33842/2313-125X-2023-23-90-97>.

4. Kreis, A., Hirz, M., & Rossbacher, P. (2020). CAD-Automation in Automotive Development – Potentials, Limits and Challenges. *Computer-Aided Design and Applications*, 18(4), 849–863. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2021.849-863>.

5. McLoughlin, I. (1990). Management, Work Organisation and Cad - Towards Flexible Automation? *Work, Employment and Society*, 4(2), 217–237. <https://doi.org/10.1177/0950017090004002003>.

6. Moreno, R., & Bazán, A.M. (2017). Automation in the Teaching of Descriptive Geometry and CAD. High-Level CAD Templates Using Script Languages. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245, 062040. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/245/6/062040>.

Отримано 29.11.2024

UDC 621.9

Anton Shcherban¹, Vyacheslav Vovk², Serhii Maidaniuk³, Yurii Besarabets⁴

¹Student of the Department of Machine Design

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

E-mail: anton619ton@gmail.com

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Design

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

E-mail: 010479@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5122-6198>. ResearcherID: [H-9328-2017](https://orcid.org/H-9328-2017)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Design

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

E-mail: maysv3@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2853-8606>. ResearcherID: [J-7542-2017](https://orcid.org/J-7542-2017)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Design

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

E-mail: york.bessar@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0773-099X>

SIMPLIFICATION IN THE ANALYSIS OF COMPONENT UNITS AND AUTOMATION OF WORKING WITH THEM

This article is a scientific and methodological publication. Working with large-scale assemblies in mechanical engineering, containing hundreds or even thousands of parts, requires special approaches to modeling, analysis, and process automation. The main challenges relate to optimizing CAE calculations, accelerating the documentation creation, and preparing additional production files. The article discusses approaches to solving these problems using the example of a frame design created in Autodesk Inventor 2024, with the possibility of applying the proposed methods in other CAD programs.

Strength analysis of assemblies with numerous assembly parts by the finite element method can be resource-intensive due to the large amount of computation. To overcome this problem, it is proposed to create simplified models that exclude small parts and elements that do not affect the calculation results. In the case of a structure consisting of 95 % sheet materials, an effective solution is to replace solid elements with equivalent surfaces. This approach reduces the computational complexity of the problem by eliminating one spatial coordinate, which can reduce the calculation time by 30 %. In addition, the elimination of small elements allows the use of a larger mesh size, which further speeds up the process.

Automation of the processes of preparing additional production files is performed using iLogic, a tool that allows you to create scripts for automatic file generation. As part of the project, a script was developed to automatically generate DXF files of sheet metal part scans, taking into account model properties such as designations, thickness, and number of parts. The generated files are sorted into folders according to the specified parameters. Similarly, a scenario for automatic export of drawings to PDF format is implemented in compliance with the specified directory structure. These processes significantly reduce the time required to perform routine tasks and reduce the number of errors.

The proposed methods provide an integrated solution for working with large assemblies, which increases labor productivity, reduces the time for performing monotonous operations, and minimizes the influence of the human factor. The presented approaches are versatile and can be adapted to other CAD systems, making them useful for a wide range of tasks in the field of mechanical engineering.

Keywords: CAD; Inventor; mechanical engineering; automation; optimization; assemblies.

Fig.: 6. **References:** 6.

**Анастасія Вячеславівна Шкрабова¹, Денис Володимирович Казарін²,
Сергій Володимирович Майданюк³, Вячеслав Володимирович Вовк⁴,
Юрій Йосипович Бесарабець⁵**

¹студентка кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: anastasii.shkrabova-mm12@iit.kpi.ua

²студент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: denys.kazarin-mm1@iit.kpi.ua

³кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: maysv3@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2853-8606>, ResearcherID: [J-7542-2017](https://orcid.org/0000-0003-2853-8606)

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: 010479@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5122-6198>, ResearcherID: [H-9328-2017](https://orcid.org/0000-0001-5122-6198)

⁵кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: york.bessar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0773-099X>

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЗАГОСТРЕННЯ ДИСКОВИХ ЗАКРІЙНИХ НОЖІВ

Якість загострення дискових закрійних ножів має важливе значення для швейної промисловості, впливаючи на ефективність виробництва та довговічність інструментів. Проблема невеликих швейних підприємств є відсутність універсальних та високоефективних пристроїв для загострення, відновлення закрійних ножів, що призводить до браку продукції, високих витрат та підвищеного рівня безпеки. На основі аналізу кінематичних рухів, необхідних для загострення дискових закрійних ножів, було розроблено кінематичну схему пристрою для загострення ножів. Провівши аналіз конструктивного виконання окремих елементів кінематичної схеми було спроектовано пристрій для відновлення дискових закрійних ножів із високою точністю, низькою вартістю та мінімальними витратами на обслуговування. Описано принцип роботи пристрою, що включає налаштування кута заточування, фіксацію різних діаметрів ножів та забезпечення стабільної якості обробки.

Ключові слова: дисковий закрійний ніж; швейна промисловість; загострення; пристрій для загострення; якість.
Рис.: 3. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. На сьогодні якість та точність відновлення зношених дискових закрійних ножів має велике значення для швейної промисловості. Від процесу загострення залежать не лише довговічність самого інструменту, але і якість розкрою тканин та їх витрати на кожний виріб [1]. Сучасне виробництво вимагає високої якості та сталості загострення ножів, що стає ключовим фактором для забезпечення безперервного та ефективного функціонування всього виробничого циклу. Це робить тему розробки пристрою для загострення дискових закрійних ножів на невеликих швейних підприємствах надзвичайно актуальною і важливою для дослідження.

Постановка проблеми. Недостатньо загострені ножі можуть стати причиною значних проблем, таких як:

- підвищений рівень браку продукції;
- збільшення витрат, пов'язаних із частою заміною інструментів;
- підвищений рівень безпеки для людей, які працюють цим інструментом [2].

Основною проблемою невеликих швейних підприємств є відсутність універсальних і високоефективних пристроїв для відновлення зношених дискових закрійних ножів, які б забезпечували максимальну якість та сталості загострення. Наявні пристрої часто мають обмеження в налаштуваннях і вимогах до обслуговування, що знижує їхню ефективність та зручність використання. Вирішення цієї проблеми передбачає розробку пристрою для загострення дискових закрійних ножів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження та публікації у сфері поновлення працездатності дискових закрійних ножів, на жаль, обмежені, у зв'язку зі специфічністю напрямку досліджень. Загалом є верстати для загострення дискових ножів, орієнтовані здебільшого на велику швейні фабрики.

Верстати для загострення дискових ножів за типами поділяються на:

- універсальні,
- напівавтоматичні
- з числовим програмним керуванням (ЧПК)

Універсальні верстати для загострення є універсальними рішенням, особливо для малих швейних підприємств. Вони можуть бути налаштовані для роботи з різними типами ножів за допомогою спеціальних пристосувань та є відносно економним варіантом. Проте для їх ефективного використання потрібен фахівець високої кваліфікації, здатний правильно налаштувати обладнання і виконувати процес загострення вручну, що суттєво впливає на якість загострення, яка може бути не стабільною. Таким чином, універсальні верстати для загострення забезпечують середній рівень якості та швидкості загострення.

Напівавтоматичні верстати для загострення є раціональним рішенням для малих та середніх швейних підприємств. Вони поєднують високу якість загострення з порівняно невеликими капіталовкладеннями. Ці верстати мають часткову автоматизацію, що дозволяє досягти високого рівня точності та швидкості обробки, зменшуючи вимоги до кваліфікації оператора. Напівавтоматичні верстати є ефективними для підприємств, яким необхідно відновлювати ножі різних типів, забезпечуючи стабільність і рівномірність загострення. Завдяки доступності та відносно низьким витратам на обслуговування вони часто є найбільш раціональним вибором для підприємств середнього рівня.

Верстати для загострення з ЧПК є сучасними високоточними верстатами, які дозволяють швидко та якісно загострювати широкий спектр ножів, забезпечують стабільно високу якість з мінімальним втручанням оператора. Однак такі верстати потребують значних капіталовкладень та спеціалістів із високою кваліфікацією для налаштування, обслуговування та управління процесом, що робить їх особливо доцільними для великих текстильних підприємств з високими вимогами до точності та продуктивності [3].

Серед великого розмаїття верстатів для загострення (відновлення) дискових ножів найшли широке застосування верстати від німецького виробника KNECHT (рис. 1):

- для загострення вручну:
- верстат для загострення А 400 [4];
- універсальний верстат для вологого шліфування USK S 200 [5];
- для автоматичного загострення
- верстат для загострення серпоподібних та дискових ножів А 75 [6].



а

б

в

Рис. 1. Модельний ряд верстатів для вологого шліфування:

а – верстат для загострення А 400; б – верстат для вологого шліфування USK S 200;
в – верстат для загострення серпоподібних та дискових ножів А 75

Джерело: розроблено авторами.

Переваги та недоліки даних моделей верстатів представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Аналіз верстатів для загострення німецького виробника KNECHT

Модель	Переваги	Недоліки
Верстат для загострення А 400	<ul style="list-style-type: none"> – точність та якість загострення – стіл розташований під кутом – для зручності роботи – наявність копіювально-шліфувальної плити – низька вартість обладнання 	<ul style="list-style-type: none"> – загострення вручну – необхідність додаткового пристрою – невисока стабільність загострення окремих граней ножів – необхідність певної кваліфікації персоналу
Універсальний верстат для вологого шліфування USK S 200	<ul style="list-style-type: none"> – точність та якість загострення – надійне кріплення ножів – низька вартість обладнання 	<ul style="list-style-type: none"> – загострення вручну – необхідність додаткового пристрою – невисока стабільність загострення окремих граней ножів – необхідність певної кваліфікації персоналу
Верстат для загострення серпоподібних та дискових ножів А 75	<ul style="list-style-type: none"> – автоматичне загострення ножів – висока точність та якість загострення – висока швидкість загострення – можливість загострення ножів в масовому виробництві – низька вартість загострення 	<ul style="list-style-type: none"> – необхідність високої кваліфікації персоналу – наявність систем безпеки для захисту оператора – висока вартість обладнання

Джерело: розроблено авторами.

Згідно з цим оглядом видно, що використання верстатів є дуже дорогим для більшості швейних компаній, а ціна не зовсім виправдана для малих фірм.

Мета статті. Основною метою даної статті є розробка власного ефективного та зручного пристрою для загострення дискових закріпних ножів, який у свою чергу буде мати невелику вартість, забезпечуватиме високу якість і сталість загострення з мінімальними витратами на обслуговування. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання: розробка конструкції пристрою, проведення тестування та аналіз результатів.

Виклад основного матеріалу. Розробка пристрою передбачає налаштування для загострення широкого діапазону дискових закріпних ножів, а саме: ножі мають від 4 до 8 граней залежно від їхнього діаметра, діаметр ножів від 50 до 110 мм, кути загострення ножів 15° та 30°.

Загальний вигляд кінематичної схеми пристрою наведено на рис. 2.

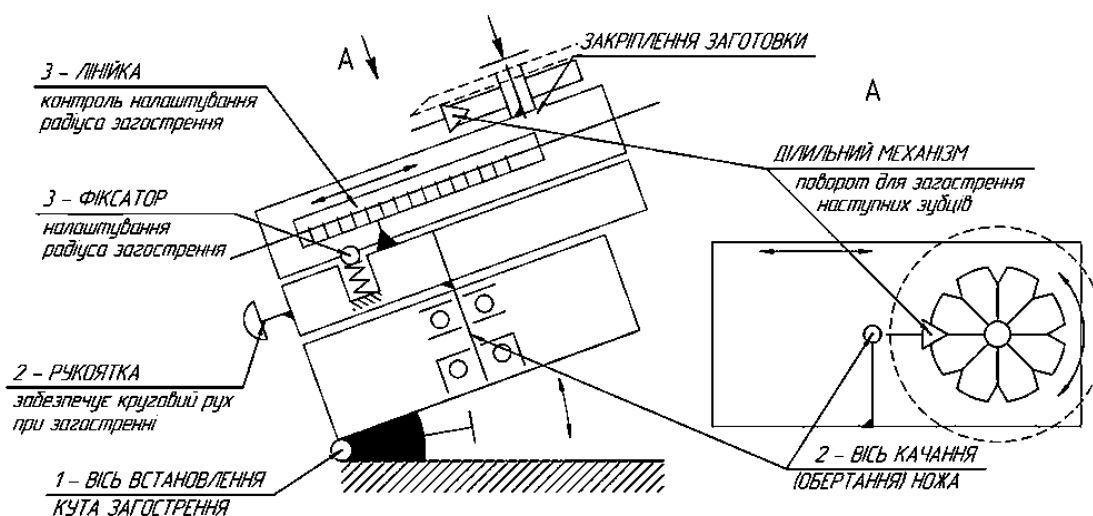


Рис. 2. Кінематична схема пристосування для загострення [7]

Робота пристрою для загострювання дискових закрійних ножів полягає в наступному:

- позиціонування ножа під певним кутом загострення забезпечується за допомогою механізму повороту ножа 1 (рис. 2) [7];
- загострення різальної кромки ножа по дузі кола здійснюється за рахунок руху ножа по дузі навколо осі качання ножа (поз. 3). Пристрій оснащений керуванням цим рухом за допомогою руків'я (поз. 2) (рис. 2). Для точного налаштування ножа передбачений механізм фіксації цього руху в початковому положенні [7];
- налаштування на різну кількість кількості різальних кромek дискового ножа виконана за рахунок ділильного механізму (рис. 2), фіксація якого забезпечується фіксатором встановленням у відповідні положення [7];
- для загострення ножів різних діаметрів і з відповідними радіусами різальної кромки у пристрої передбачено механізм регулювання радіуса загострення, який дозволить здійснювати переміщення загострюваного ножа, відносно осі качання (загострення), та фіксувати його положення за допомогою фіксатора (поз. 3); контроль налаштування на відповідний діаметр ножа відбувається лінійкою (поз. 3) (рис. 2) [7].

За кінематичною схемою було розроблено пристрій для загострювання дискових закрійних ножів з урахуванням конструктивних механізмів та елементів, деталі якого зображенні на (рис. 3) [7].

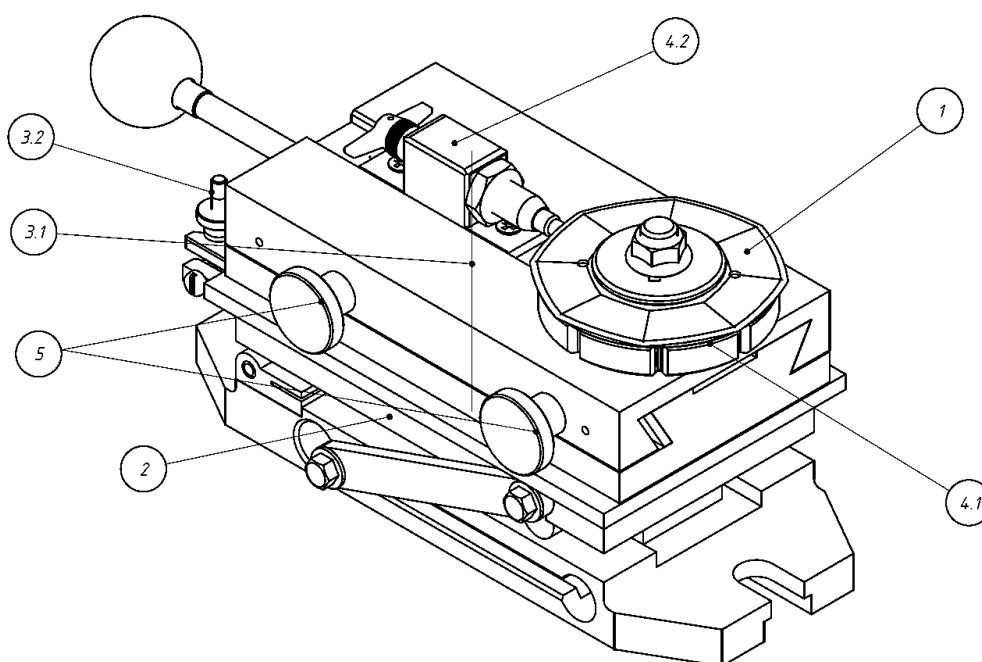


Рис. 3. Пристрій для загострення ножів розкрійних [7]:

- 1 – ніж дисковий, 2 – синусний стіл – забезпечує регулювання кута нахилу ножа,
 3 – елементи, що забезпечують кругову подачу по радіусу загострення:
 3.1 – вісь обертання / качання, 3.2 – фіксатор для налаштування,
 4 – елементи, що забезпечують загострення певної кількості граней:
 4.1 – ділильний диск, 4.2 – фіксатор,
 5 – елементи, що регулюють налаштування на необхідний радіус загострення:
 фіксатор (не показано) та гвинти

Цей пристрій для заточування розкрійних ножів (рис. 3.) дозволяє загострювати ножі з різними кутами та діаметрами. Для ножів діаметром 70, 100 і 110 мм передбачені фіксовані позиції, налаштування ножів інших діаметрів можна контролювати за допомогою лінійки [7].

Дисковий ніж 1 закріплюється на оправці й фіксується гайкою (рис. 3). Синусний стіл 2 (рис. 3.) нахилиється на потрібний кут загострення за допомогою плоскопаралельних кінцевих мір, розмір яких розраховується за теоремою синусів [7].

Для забезпечення радіусної форми різальної кромки ножів у пристрої передбачена вісь обертання (качання) 3.1, яка забезпечує кругову подачу по радіусу загострення. Для налаштування пристрою необхідно заблокувати обертання навколо цієї осі, для чого використовується фіксатор 3.2. В процесі загострення фіксатор 3.2 залишається незакріпленим (рис. 3) [7].

Фіксатор 4.2 входить у пази ділильного диска 4.1 і фіксує певну грань для загострення. Для зміни грані фіксатор витягується з поточного положення і ділильний диск переміщується в наступне положення для загострення наступної грані ножа [7].

Регулювання радіуса загострення різальної кромки здійснюється за допомогою поздовжнього переміщення ползунків із загострюваним ножем по напрямній та їх фіксації в потрібному положенні гвинтами 5. У пристрої передбачені стандартні налаштування на радіуси 70, 100 та 110 мм, що забезпечуються за допомогою фіксатора, не показаного на (рис. 3) [7].

Розроблений пристрій дозволяє проводити загострення дискових ножів за двома схемами загострення: торцем круга та периферією круга [7].

При схемі загострення торцем круга спостерігається контакт дискового ножа з торцем круга по лінії, в результаті чого в нормальному перерізі отримуємо прямолінійну поверхню. Але при такій схемі виникає ряд складнощів стосовно безпечного встановлення дискового ножа, а зона загострення закрита для спостереження [7].

При схемі загострення периферією круга встановлення дискового ножа більш просте та безпечне, а зона загострення відкрита для спостереження. При цьому можливо отримати дві різних форми загостреної поверхні, залежно від розташування осі обертання ножа (п. 3.1 рис. 3) відносно осі круга:

– осі розташовуються в одній площині – спостерігається контакт дискового ножа з торцем круга по лінії, відповідно, в нормальному перерізі отримуємо прямолінійну поверхню, як при загостренні торцем круга;

– осі розташовуються в різних площинах – спостерігається контакт дискового ножа з торцем круга по дузі кола, відповідно, в нормальному перерізі отримуємо поверхню еліпсоїдальної форми, отримуємо так зване «шабельне загострення» [7].

Методика дослідження.

Перевірка якості роботи розробленого пристрою проводилася шляхом порівняння роботи загострених закрійних ножів.

Загострення ножів проводилося кругом 1A1-1 125×17×32 ЛО 11 С1 100 % Б1 ГОСТ 16174, з використанням розробленого пристрою, на універсально-загострювальному верстаті 3А64М за схемою загострення периферією круга, при цьому осі обертання ножа та осі круга розташовуються в різних площинах.

Як розкрійний інструмент використовували ручний дисковий розкрійний ніж Anysew RSD-70 виробництва Hangzhou Anysew Garment Equipment Co., Ltd. (China), оснащений механізмом відновлення.

Таким чином, у дослідженнях брали участь восьмигранні дискові закрійні ножі діаметром 70 мм з кутами загострення 15° та 30°, які були відновлені пристроєм розкрійного ножа та загострені на розробленому пристрої (табл. 2).

У випробуваннях якості розкрою тканини восьмигранними дисковими ножами брали участь такі матеріали [2]:

- основні (тонкі) тканини (плащівка, трикотаж (трюхнитка) та сатин);
- додаткові (товсті) тканини (плащівка з утеплювачем, махрова тканина, хутро синтетичне та натуральне).

Результати розкрою тканин дисковими закрійними ножами наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Розкрій тканини восьмигранними дисковими закрійними ножами

Параметри дискових закрійних ножів: діаметр ножів – 70 мм, кількість граней – вісім;						
Кут загострення	15°			30°		
Стан ножів	відновлений	загострений	новий	відновлений	загострений	новий
Результати розкрою тканин						
Вид тканини	Результати розкрою					
Плащівка	Недоліків немає. Крій не бракований			Недоліків немає. Крій не бракований		
Трикотаж (трюхнитка)	Підтягує нитку. Крій не бракований	Недоліків немає. Крій не бракований		Крій бракований	Витягує нитку. Крій бракований	
Сатин	Недоліків немає. Крій не бракований			Підтягує нитку. Крій не бракований	Недоліків немає. Крій не бракований	
Плащівка з утеплювачем	Недоліків немає. Крій не бракований			Деформує розкрій. Крій бракований	Крій не бракований	Деформує розкрій. Крій бракований
Махрова тканина	Витягує нитку. Крій бракований	Крій не бракований	Підтягує нитку. Крій не бракований	Витягує нитку. Крій бракований	Крій не бракований	Підтягує нитку. Крій не бракований
Хутро синтетичне	Деформує розкрій, оплавляє край тканини. Крій не бракований	Крій не бракований	Підтягує нитку. Крій не бракований	Оплавляє край тканини. Крій не бракований	Крій не бракований	
Хутро натуральне	Деформує розкрій. Крій бракований	Затягує ворс. Крій не бракований		Деформує розкрій. Крій бракований	Затягує ворс. Крій не бракований	

Примітки:

відновлений – дисковий ніж відновлений за допомогою пристрою відновлення, яким оснащено розкрійний ніж Anusew RSD-70 (шліфувальний круг);

загострений – дисковий ніж загострений за допомогою розробленого пристрою, з утворенням загостреної поверхні еліпсоїдальної форми.

Результати дослідження. У результаті порівняльних випробувань розкрою різних тканин восьмигранними дисковими закрійними ножами встановлено:

– якість розкрою тканин суттєво залежить від гостроти різальної кромки закрійних ножів, особливо при розкрою тонких та натуральних тканин;

– пристрій для відновлення гостроти закрійного ножа, яким оснащено розкрійні ножі, хоч і дозволяє відновити дискові закрійні ножі, але не дозволяє досягти необхідної гостроти різальної кромки, що впливає на якість розкрою, особливо при розкрою синтетичних матеріалів;

– дискові ножі з кутом загострення 15° дозволяють якісно розкромити як тонкі та ніжні тканини, рекомендовані для таких ножів, так і більш товсті та щільні тканини, не рекомендовані до розкрою такими ножами [2];

– дискові ножі з кутом загострення 30° дозволяють якісно розкромити більш товсті та щільні тканини, на відміну від тонких та ніжних тканин;

– якість розкрою:

– тонких та ніжних тканин новими та загостреними ножами не відрізняється;

– товстих та щільних тканин загостреними ножами краща, ніж новими, що пояснюється еліптичною формою поверхні ножа «шавельного загострення», особливо ножами з кутом загострення 30°;

– продуктивність розкрою тканини загостреними ножами в 1,2 – 1,5 раза вища, ніж новими ножами, особливо при розкрою тонких та ніжних тканин ножами з кутом загострення 15°, що пояснюється еліптичною формою поверхні ножа «шавельного загострення» та якістю самого загострення.

Висновки. На підставі проведених досліджень поновлення працездатності дискових закрийних ножів можна зробити такі висновки:

– проблема ефективності загострення дискових закрийних ножів є надзвичайно актуальною для швейної промисловості, особливо для невеликих швейних підприємств, оскільки від цього залежить не тільки якість розкрою тканини, але й загальна ефективність виробничих процесів підприємства;

– існуючі верстати та пристрої для загострення дискових ножів мають ряд обмежень, серед яких висока вартість обладнання та його обслуговування, складність налаштування та наявність в штаті підприємства висококваліфікованих операторів;

– якість розкрою тканини загостреними на розробленому пристрої дисковими ножами за схемою загострення з утворенням еліптичної форми поверхні ножа «шавельне загострення» краща, ніж новими, особливо при розкрою товстих та щільних тканин;

– продуктивність розкрою тканини загостреними ножами в 1,2 – 1,5 раза вища, ніж новими ножами.

Вирішення цих проблем стало можливим завдяки розробці нового пристрою для загострення дискових закрийних ножів, який поєднує в собі низьку вартість, високу точність і простоту обслуговування.

Описаний пристрій дозволяє ефективно обробляти ножі широкий діапазон діаметрів ножів і з різними кутами загострення, забезпечуючи стабільну якість та високу продуктивність при мінімальних витратах. Завдяки регулюванню кута загострення та можливості налаштування діаметра ножа, цей пристрій стане вигідним і зручним рішенням для малих і середніх підприємств, де вимагається оптимізація виробничих процесів та зниження витрат.

Список використаних джерел

1. Розкройне обладнання [Електронний ресурс] // Тех-Prom.com.ua. – Режим доступу: <https://tex-prom.com.ua/ua/raskrojnoe-oborudovanie>.

2. Шовкомуд, О. В. Устаткування швейної промисловості [Електронний ресурс] : навчальний посібник / О. В. Шовкомуд, Т. М. Головенко, В. С. Пуць. – Луцьк : Вежа-Друк, 2023. – 280 с. – Режим доступу: <https://bit.ly/4gaFaZd>.

3. Шкрабова, А. В. Верстат для загострення дискових закрийних ножів [Електронний ресурс] / А. В. Шкрабова, С. В. Майданюк // Інновації молоді в машинобудуванні: матеріали XV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів, (м. Київ, 23 квіт. - 3 трав. 2024 р.). – Київ, 2024. – Режим доступу: <https://imm-mmi.kpi.ua/imm2024/paper/view/30749/17600>.

4. Sharpening Machine A 400 [Electronic resource] // KNECHT GmbH. – Mode of access: <https://www.knecht.eu/en/products/grinding-machines/grinding-machines-for-sickle-shaped-and-circular-knives/a-400>.

5. Universal Wet-Sharpener Machine S 200 [Electronic resource] // KNECHT GmbH. – Mode of access: <https://www.knecht.eu/en/products/grinding-machines/sharpening-machines-for-cutter-knives/s-200>.

6. Grinding Machine for Sickle-shaped and Circular Knives A 75 [Electronic resource] // KNECHT GmbH. – Mode of access: <https://www.knecht.eu/en/products/grinding-machines/grinding-machines-for-sickle-shaped-and-circular-knives/a-75>.

7. Шкрабова, А. В. Ніж дисковий для розкрою тканини: дипломний проект бакалавра: 131 Прикладна механіка [Електронний ресурс] / А. В. Шкрабова. – Київ, 2023. – 85 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/60297>.

References

1. Rozkriine obladnannia [Cutting equipment]. (n.d.). *tex-prom.com.ua*. <https://tex-prom.com.ua/ua/raskrojnoe-oborudovanie>.
2. Shovkomud, O.V., Holovenko, T.M., Puts, V.S. (2023). *Ustatkuvannia shveinoi promyslovosti [Equipment of the garment industry]*. Vezha-Druk.
3. Shkrabova, A.V., Maidaniuk, S.V. (2024). Verstat dlia zahostrennia diskovykh zakriinykh nozhiv [A machine for sharpening disk-type knives]. *Innovatsii molodi v mashynobuduvanni – Innovations of youth in mechanical engineering: materials of the XV International science and technology conference of young scientists and students*. KPI imeni Ihoria Sikorskoho. <https://imm-mmi.kpi.ua/imm2024/paper/view/30749/17600>.
4. KNECHT. Sharpening Machine A 400. (n.d.). *www.knecht.eu*. <https://www.knecht.eu/en/products/grinding-machines/grinding-machines-for-sickle-shaped-and-circular-knives/a-400>.
5. KNECHT. Sharpening machines for cutter knives. USK S 200. (n.d.). *www.knecht.eu*. <https://www.knecht.eu/en/products/grinding-machines/sharpening-machines-for-cutter-knives/s-200>.
6. KNECHT. Grinding Machine for Sickle-shaped and Circular Knives A 75 (n.d.). *www.knecht.eu*. <https://www.knecht.eu/ru/produkty/zatochnye-stanki/stanki-dlja-zatochki-diskovykh-i-serpovidnykh-nozhei/a-75>.
7. Shkrabova, A.V. (2023). Nizh diskovyi dlia rozkroi tkanyny [Disc knife for cutting fabric]. *Bachelor's thesis*. Kyiv. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/60297>.

Отримано 29.11.2024

UDC 621.9

**Anastasiia Shkrabova¹, Denys Kazarin², Serhii Maidaniuk³,
Vyacheslav Vovk⁴, Yurii Besarabets⁵**

¹Student of the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: anastasiia.shkrabova-mmi22@lil.kpi.ua

²Student of the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: denys.kazarin-mmi@lil.kpi.ua

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: maysv3@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2853-8606>. **ResearcherID:** J-7542-2017

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: 010479@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5122-6198>. **ResearcherID:** H-9328-2017

⁵PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: york.bessar@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0773-099X>

DISC KNIFE SHARPENING DEVICE FOR CUTTING KNIVES

The quality of disc cutter sharpening is important to the garment industry, affecting production efficiency and tool life. The main problem of small sewing enterprises is the lack of universal and highly efficient devices that would provide an opportunity to qualitatively and inexpensively restore the disc cutters used by the enterprise.

Existing machines for sharpening disk knives provide the opportunity to restore knives with high quality, but they either require additional adaptation, a certain qualification of personnel to work on them and, at the same time, do not ensure a high stability of sharpening of individual faces of disk knives, which can lead to an increased level of danger, or the high cost of the equipment and the need to have highly qualified specialists on staff to work with it do not allow a small sewing company to purchase it.

Thus, the task of developing an easy-to-use and reliable device for sharpening disk knives using a universal sharpening machine for small sewing enterprises is urgent.

Based on the analysis of sharpening kinematics, a kinematic diagram of a universal device for sharpening disk knives in a wide range of knife diameters and with different numbers of faces was developed. The analysis of possible structural designs of individual nodes of the kinematic scheme made it possible to design, on the basis of simple structural designs, an easy-to-use, reliable, and safe device that will allow the restoration of disc knives with high quality and reliability, with constant stability, which does not depend on the operator.

To expand the technological capabilities, taking into account the demands of sewing enterprises, the device was equipped with a mechanism for adjusting the angle of sharpening knives, built on the basis of a sine mechanism, which allows you to precisely adjust the angle of sharpening, as it affects the functional purpose of the disc knife, that is, the material of the fabric to be cut.

Keywords: disk closing knife; garment industry; aggravation; sharpening device; quality.

Fig.: 3. **References:** 7.

Світлана Іванівна Радкевич¹, Вільям Олександрович Залоза²

¹аспірантка кафедри механічної інженерії
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: asp_rsi@student.ztu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8791-1653>

²професор кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів
Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: zalogav@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7444-485X>

**ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ
З ВИКОРИСТАННЯМ ІНСТРУМЕНТІВ З КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ**

У цій статті розглядаються теоретичні аспекти оброблюваності важкооброблюваних матеріалів при торцевому фрезеруванні з використанням інструментів, виготовлених на основі кубічного нітриду бору (КНБ). Основна увага приділяється аналізу фізико-механічних властивостей інструментів із КНБ, що роблять цей матеріал ефективним для обробки твердих матеріалів, а також як впливають на шорсткість отриманої поверхні різні параметри різання. Інструменти з КНБ відзначаються високою твердістю і зносостійкістю, що дозволяє їм витримувати високі температури й механічні навантаження під час процесу фрезерування. Завдяки цим властивостям, вони можуть значно підвищити ефективність процесу обробки та забезпечити високу якість обробленої поверхні важкооброблюваних матеріалів. Теоретичний аналіз також включає в себе розгляд оптимальних параметрів різання, таких як швидкість різання, глибина різання і подача. Визначено, що раціональний вибір цих параметрів може значно знизити зношування інструментів і покращити якість обробки. Особливу увагу приділено таким параметрам різання як швидкість різання і подача, які можуть значно вплинути на температурний режим в зоні різання і, відповідно, на зносостійкість інструментів та якість обробленої поверхні. Загалом стаття підкреслює важливість використання інструментів із КНБ для торцевого фрезерування важкооброблюваних матеріалів, а також необхідність оптимізації технологічних параметрів для досягнення максимальної ефективності процесу.

Ключові слова: торцеве фрезерування; кубічний нітрид бору; фізико-механічні властивості; зносостійкість; оптимізація параметрів.

Рис.: 5. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. Актуальність цієї роботи полягає в необхідності підвищення ефективності процесів обробки твердих матеріалів, таких як сталі високої твердості й чавуни, що використовуються в різних галузях промисловості, включаючи автомобілебудування, авіацію та машинобудування.

Використання інструментів з полікристалічного кубічного нітриду бору (ПКНБ) дозволяє досягти високої якості обробки, зниження витрат на обслуговування і підвищення продуктивності завдяки їх винятковій зносостійкості та здатності витримувати високі температури. Наукове обґрунтування та теоретичний аналіз процесу торцевого фрезерування з використанням ПКНБ інструментів є важливими аспектами для розробки нових методів обробки, які можуть бути впроваджені у виробничі процеси для підвищення їхньої ефективності та економічності.

Особлива увага приділяється оптимізації параметрів різання, що дозволяє зменшити зношування інструментів і покращити якість обробленої поверхні, що є критично важливим для забезпечення конкурентоспроможності виробничих підприємств. Таким чином, дослідження теоретичних аспектів торцевого фрезерування сталей і чавунів високої твердості за допомогою інструментів із ПКНБ є актуальним і має значний практичний інтерес для інженерів, технологів та науковців, які працюють у сфері обробки важкооброблюваних матеріалів.

Постановка проблеми. Обробка важкооброблюваних матеріалів завжди була викликом для виробників через швидке зношування різальних елементів інструменту і недостатню якість обробленої поверхні. Інструменти з ПКНБ пропонують потенційне оптимізаційне рішення завдяки своїм відмінним фізико-механічним властивостям, проте їх ефективне використання вимагає детального розуміння оптимальних параметрів різання та умов обробки.

Проблема полягає в тому, щоб знизити зношування інструментів і покращити якість обробки, оптимізуючи технологічні параметри різання, що дозволить значно підвищити продуктивність процесу фрезерування. Це завдання є критично важливим для покращення економічної ефективності і конкурентоспроможності виробничих процесів, особливо в умовах сучасного машинобудування та металообробки. Успішне вирішення цієї проблеми сприятиме вдосконаленню технологій обробки та підвищенню якості продукції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Авторами досліджень [1–3] встановлено, що інструмент із ПКНБ групи VL має підвищену схильність до зношування по задній поверхні при важкому переривчастому різанні, у той час як інструменти із матеріалів групи VH менш сприятливі до високих динамічних навантажень, але швидше зношуються при високошвидкісному різанні.

Зокрема, у роботі [4] авторами був проведений статистичний аналіз напружено-деформованого стану моделей різальних інструментів зі змінними різальними пластинами круглої та квадратної форм. За його результатами пластини круглої форми мають значні переваги, і їх використання може значно підвищити стійкість оснащеного ними різального інструменту.

Результати досліджень [5] з визначення характеру зношування інструментів із ПКНБ з різним вмістом нітриду бору при обробці з ударом важкооброблюваного матеріалу з різними швидкостями різання свідчать, що стійкість інструментів із ПКНБ зменшується зі збільшенням швидкості різання. При швидкості різання до 120 м/хв найкращу стійкість показували інструменти, що оснащені різальними елементами із ПКНБ групи VH, при збільшенні швидкості різання до 240 м/хв найкращу працездатність показували інструменти з різальними пластинами із ПКНБ групи VL.

Метою статті є теоретичне обґрунтування та розробка рекомендацій з оптимізації процесу торцевого фрезерування сталей із застосуванням інструментів з ПКНБ. Аналітичне дослідження спрямоване на вивчення впливу різних технологічних параметрів на якість оброблюваної поверхні та зносостійкість інструментів, а також на визначення оптимальних умов різання для підвищення продуктивності та економічної ефективності процесу. Важливим аспектом роботи є аналіз впливу параметрів різання на шорсткість поверхні, що сприяє поліпшенню умов різання та продовженню терміну служби інструментів.

Виклад основного матеріалу. Висвітлено такі параметри різання як швидкість різання, подача на зуб, глибина різання при різних режимах різання. Проаналізовано вплив параметрів різання на шорсткість поверхні, отриманої в процесі обробки. Проаналізовані параметри шорсткості включали R_a , R_q , R_z , R_t , які, розглянуті в сукупності, дають комплексну картину загальної якості поверхні [6].

При аналітичному дослідженні впливу швидкості різання на шорсткість поверхні решта параметрів мали постійні значення і були задані на рівні: подача на зуб: 0,15 мм/зуб, осьова глибина різання: 1 мм, радіальна глибина різання: 25 мм.

Значення параметрів шорсткості, виміряні для різних швидкостей різання, показані на гістограмі (рис. 1). Лінії тренду також включені, щоб показати наближення для чотирьох параметрів шорсткості, разом з поліномами, які найкраще їх описують. Найвища шорсткість була зареєстрована для швидкості різання 260 м/хв, тоді як найнижча шорсткість була зареєстрована для цього параметра, встановленому при швидкості 200 м/хв.

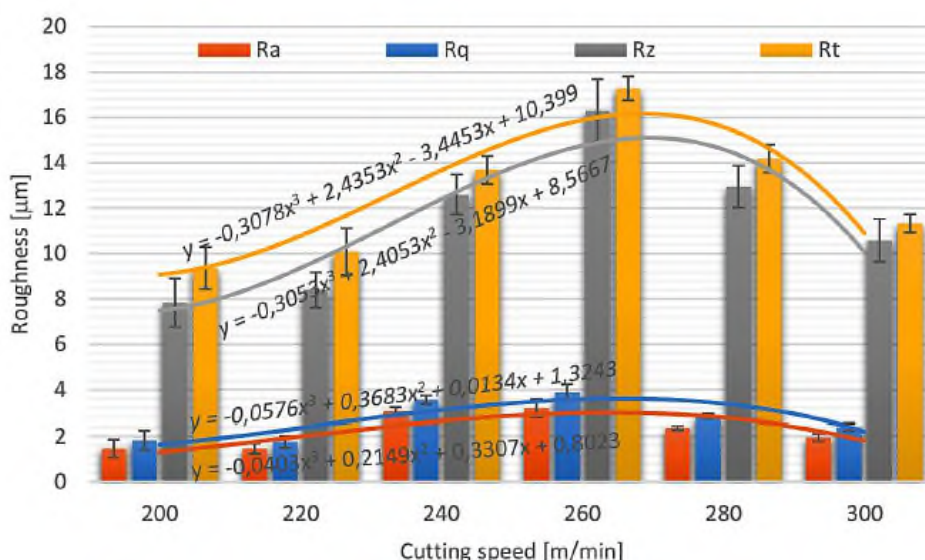


Рис. 1. Кореляція між швидкістю різання та шорсткістю аналізованої поверхні [6]

Значення шорсткості зростають зі збільшенням швидкості різання, поки не досягнуть 260 м/хв, а після цього порогу, при таких самих умовах різання, починають зменшуватися. Зростання швидкості різання в діапазоні від 200 до 220 м/хв не змінило значення параметра Ra. У випадку з іншими параметрами спостерігається певна зміна значення, однак слід пам'ятати, що ці параметри дуже чутливі до індивідуальних екстремальних відхилень. Збільшення швидкості різання до 240 і 260 м/хв призводить до значного збільшення значення всіх отриманих параметрів шорсткості. Дослідження впливу швидкості різання на шорсткість обробленої поверхні дозволило зробити наступний висновок, що спочатку збільшення швидкості різання призводить до збільшення або відсутності зміни значень параметрів, що описують показники шорсткості.

Результати вимірювань шорсткості для зростаючого значення подачі на зуб представлені графічно на гістограмі (рис. 2).

Найвища шорсткість була зареєстрована при подачі на зуб 0,13 мм/зуб (за нею слідує 0,15 мм/зуб), тоді як найнижча шорсткість була зареєстрована при подачі 0,07 мм/зуб.

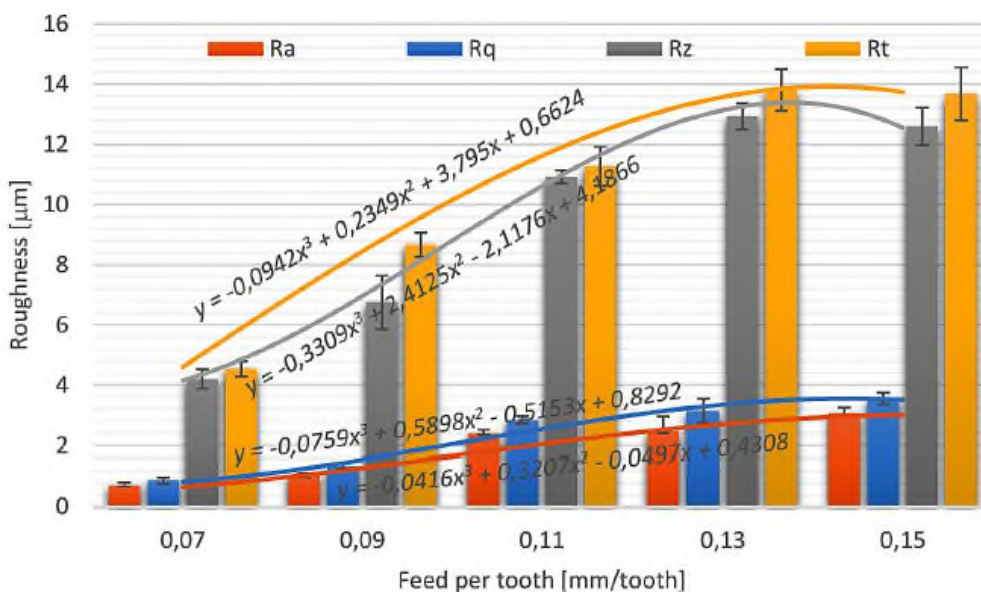


Рис. 2. Кореляція між подачею на зуб і шорсткістю аналізованої поверхні [6]

Крім того, цікавіші профілі шорсткості показані на рис. 3. Масштаб залишається однаковим для кожного з них, тому їх легше порівнювати. З попереднього графіка ми бачили, що значення шорсткості зростають зі збільшенням величини подачі, і відмінності досить помітні, за винятком двох останніх зразків, де результати дуже схожі, хоча самі профілі шорсткості досить різні.

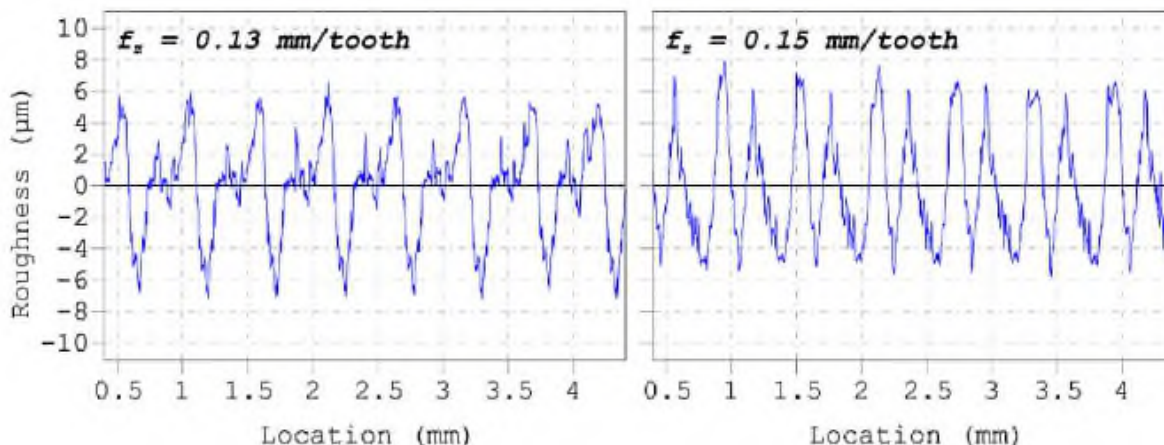


Рис. 3. Порівняння профілів шорсткості, отриманих для значень подачі на зуб 0,13 і 0,15 мм/зуб [6]

При дослідженні зв'язку між осьюою глибиною різання та шорсткістю поверхні решта параметрів мали постійні значення і були наступними: швидкість різання: 240 м/хв, подача на зуб: 0,07 мм/зуб, радіальна глибина різання: 25 мм.

Значення шорсткості поверхні, отримані для різної осьової глибини різання, зображені на гістограмі на рис. 4. Найвища шорсткість була зареєстрована для осьової глибини різання 0,75 мм, тоді як найнижча шорсткість була зареєстрована для параметра, встановленого на 0,5 мм.

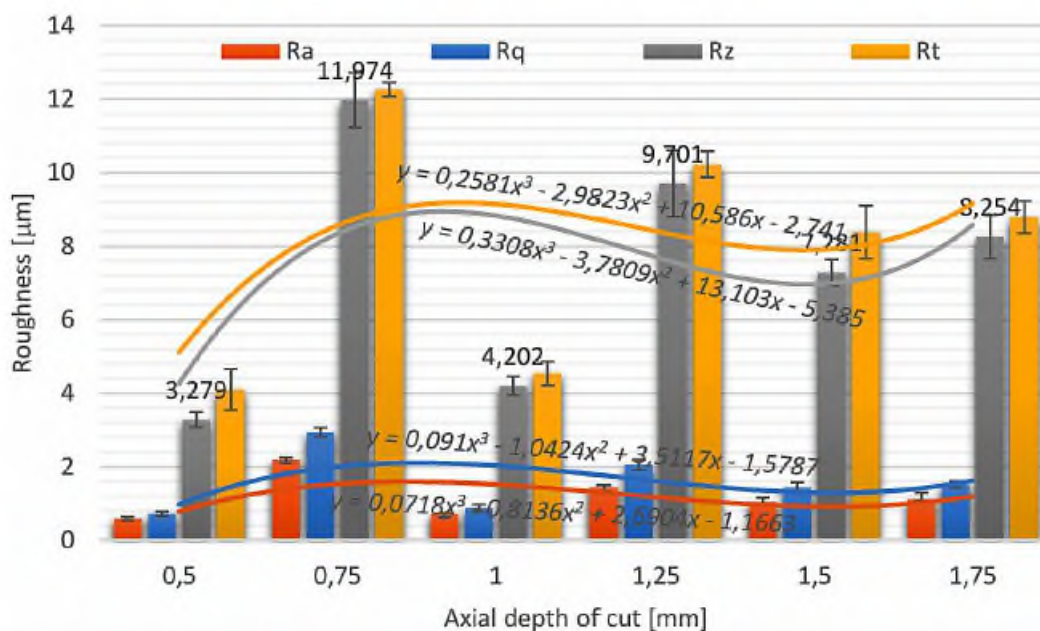


Рис. 4. Кореляція між осьовою глибиною різання і шорсткістю аналізованої поверхні [6]

Особливо цікаві профілі шорсткості, отримані для різної осьової глибини різання, показані на рис. 5. Масштаб однаковий для всіх ділянок. Найвищі піки припадають на значення 0,75 мм, і картина шорсткості помітно відрізняється від решти.

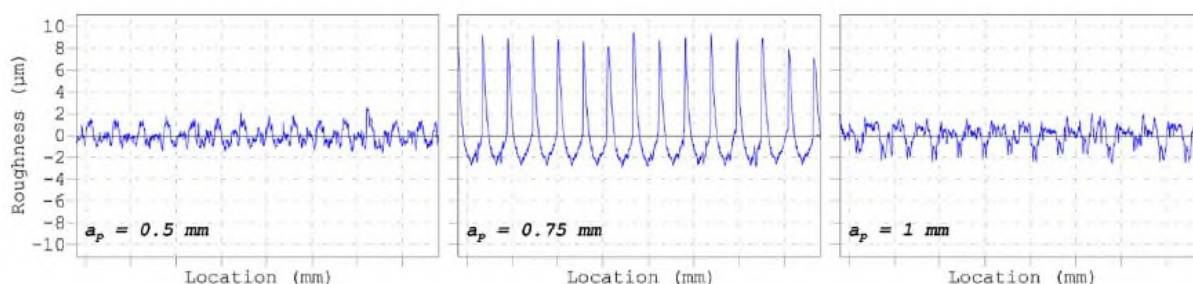


Рис. 5. Порівняння інших профілів шорсткості, отриманих для значень осьової глибини різання від 0,5 до 1 мм [6]

Висновки. Як свідчать аналітичні результати досліджень, більша подача на зуб призводить до більш шорсткої обробки поверхні, тоді як менша подача на зуб забезпечує більш гладку обробку поверхні. Це пояснюється тим, що більша подача на зуб означає, що інструменту доводиться знімати більше матеріалу з кожним проходом, що може призвести до появи більшої кількості слідів від інструменту та нерівностей на поверхні.

І навпаки, менша подача на зуб означає, що інструмент знімає менше матеріалу за кожен прохід, що призводить до більш гладкої поверхні.

Однак оптимальна подача на зуб залежить також від інших факторів, таких як оброблюваний матеріал, геометрія різального інструменту та швидкість різання. Вища швидкість різання та гостріший різальний інструмент можуть забезпечити більшу подачу на зуб без збільшення шорсткості поверхні. Тому важливо враховувати всі ці фактори разом при виборі відповідної подачі на зуб для досягнення бажаної шорсткості поверхні.

Список використаних джерел

1. Chou, Y. K. Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting / Y. K. Chou // *Wear*. – 2003. – № 255. – Pp. 1388-1394.
2. Chou, Y. K. Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting / Y. K. Chou, C. J. Evans // *Wear*. – 1999. – № 225-229. – Pp. 234-245.
3. Diniz, A. E. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting / A. E. Diniz, D. M. Gomes, A. Jr. Braghini // *Mater. Processing Technol.* – 2004. – Vol. 129, № 2. – Pp. 240-248.
4. Збірні торцеві фрези з регульованими ріжучими вставками / П. В. Кушніров, І. М. Дегтярьов, А. В. Євтухов, О. Б. Руденко // *Компресорне і енергетичне машинобудування*. – 2019. – № 4 (58). – С. 6-10.
5. Diniz, A. E. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools / A. E. Diniz, A. J. Oliveira // *J. Mater. Proc. Technol.* – 2008. – № 195. – Pp. 275-281.
6. Investigation of the Impact of Selected Face Milling Parameters on the Roughness of the Machined Surface for 1.4301 Steel / M. Bembenek, D. Dzienniak, A. Dzindziora, M. Sułowski, L. Ropyak // *Advances in Science and Technology Research Journal*. – 2023. – № 17(4). – Pp. 299-312. <https://doi.org/10.12913/22998624/170422>.
7. Rahman, A. M. Modeling and optimization of process parameters in face milling of Ti6Al4V alloy using Taguchi and grey relational analysis / A. M. Rahman, S. A. Rob, A. K. Srivastava // *Procedia Manufacturing*. – 2021. – Vol. 53. – Pp. 204-212.
8. Study on grinding mode effect on external conical thread quality / L. Y. Ropyak, V. Vytvytskyi, A. Velychkovych, T. Pryhorovska, M. Shovkoplias // In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. – 2021. – P. 012014.
9. Siller H. Study of face milling of hardened AISI D3 steel with a special design of carbide tools / H. Siller, C. Vila, C. Rodríguez, J. Abellán // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2009. – 40. – Pp.12-25.

References

1. Chou, Y.K. (2003). Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting. *Wear*, 255, 1388–1394.
2. Chou, Y.K., Evans, C.J. (1999). Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting. *Wear*, 225–229, 234–245.
3. Diniz, A.E., Gomes, D.M., Braghini, A.Jr. (2004). Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. *Mater. Processing Technol.*, 129(2), 240–248.
4. Kushnirov, P.V., Dehtiarov, I.M., Yevtukhov, A.V., Rudenko, O.B. (2019). Zbirni tortsevi frezy z reholovanyimi rizhuchymy vstavkamy [Prefab end mills with adjustable cutting inserts]. *Kompresorne i enerhetychne mashynobuvannia – Compressor and power engineering*, 4(58), 6–10.
5. Diniz, A.E., Oliveira, A.J. (2008). Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. *J. Mater. Proc. Technol*, 195, 275–281.
6. Bembenek, M., Dzienniak, D., Dzindziora, A., Sułowski, M., & Ropyak, L. (2023). Investigation of the Impact of Selected Face Milling Parameters on the Roughness of the Machined Surface for 1.4301 Steel. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 17(4), 299–312. <https://doi.org/10.12913/22998624/170422>.
7. Rahman, A.M., Rob, S.A., Srivastava, A.K. (2021). Modeling and optimization of process parameters in face milling of Ti6Al4V alloy using Taguchi and grey relational analysis. *Procedia Manufacturing*, 53, 204–212.
8. Ropyak, L.Y., Vytvytskyi, V., Velychkovych, A., Pryhorovska, T., Shovkoplias, M. (2021). Study on grinding mode effect on external conical thread quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 012014.
9. Siller, H., Vila, C., Rodríguez, C., Abellán, J. (2009). Study of face milling of hardened AISI D3 steel with a special design of carbide tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40, 12–25.

Отримано 11.11.2024

UDC 621.9

Svitlana Radkevych¹, William Zaloga²

¹PhD student at the Department of Mechanical Engineering
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: asp_rsi@student.ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8791-1653>

²Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Instruments
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: zalogav@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7444-485X>

FEATURES OF THE FACE MILLING PROCESS USING CUBIC BORON NITRIDE TOOLS

This article discusses the theoretical aspects of machinability of hard-to-machine materials during face milling using tools made from cubic boron nitride (CBN). The main focus is on analyzing the physical and mechanical properties of CBN tools, which make this material effective for machining hard materials, as well as how different cutting parameters affect the roughness of the machined surface. CBN tools are characterized by high hardness and wear resistance, allowing them to withstand high temperatures and mechanical loads during the milling process. Thanks to these properties, they can significantly improve the machining efficiency and ensure the high quality of the machined surface of hard-to-machine materials.

The theoretical analysis also includes considering optimal cutting parameters, such as cutting speed, depth of cut, and feed rate. It is determined that a rational choice of these parameters can significantly reduce tool wear and improve machining quality. Special attention is paid to cutting parameters such as cutting speed and feed rate, which can significantly influence the temperature regime in the cutting zone and, consequently, the tool wear resistance and the quality of the machined surface. Overall, the article emphasizes the importance of using CBN tools for face milling of hard-to-machine materials and the need for optimization of technological parameters to achieve maximum process efficiency.

Keywords: face milling; cubic boron nitride; physical and mechanical properties; wear resistance; parameter optimization.

Fig.: 5. References: 9.

РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-4(38)-134-149

УДК 004.2

**Володимир Вікторович Казимир¹, Андрій Іванович Роговенко²,
Олексій Олександрович Карась³**

¹доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: yvkazymyr@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119>. ResearcherID: Q-2925-2016

²кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: arogovenko@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4594-5692>. ResearcherID: G-3926-2014

³студент магістратури

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: oleksiykaras2016@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8862-7234>. ResearcherID: JZT-2594-2024

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ АУДІОКЛАСИФІКАЦІЇ НА МІНІКОМП'ЮТЕРНІЙ ПЛАТФОРМІ

У статті представлено результати аналізу досвіду практичного використання існуючих моделей штучних нейронних мереж для вирішення задач аудіокласифікації на мінікомп'ютерній платформі. Визначено основні виклики, пов'язані з обробкою шумів, недостатністю маркованих даних і адаптацією моделей до специфічних умов використання. Проаналізовано архітектурні особливості побудови типових моделей нейронних мереж для задачі аудіокласифікації. Запропоновано методику використання моделей CNN, RNN та трансформерів на мінікомп'ютері NVIDIA Jetson Nano та проведено оцінку їх продуктивності при класифікації аудіошумів БПЛА. Обгрунтовано напрямки подальших досліджень для вдосконалення методів навчання та оптимізації моделей аудіокласифікації.

Ключові слова: штучні нейронні мережі; аудіокласифікація; мінікомп'ютер; NVIDIA Jetson Nano; БПЛА.

Рис.: 10. Табл.: 8. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Сучасні технології обробки аудіо сигналів значно розширюють можливості застосування штучних нейронних мереж (ШНМ) для вирішення завдань класифікації аудіо. Зростання доступності даних, обчислювальних ресурсів та вдосконалення алгоритмів глибокого навчання стимулюють дослідження та розробку нових підходів у цій сфері. Аудіо класифікація має широкий спектр застосувань, включаючи розпізнавання мови, класифікацію музичних жанрів, ідентифікацію емоцій за голосом, діагностику технічного обладнання за звуками та моніторинг навколишнього середовища, включаючи розпізнавання повітряних цілей.

Основними викликами у сфері класифікації аудіо є обробка шумів, недостатність маркованих даних та адаптація моделей до специфічних умов використання вбудованих систем. У зв'язку з цим значну увагу приділяють дослідженню продуктивності реалізації різних моделей ШНМ [1], в тому числі на графічних процесорах та FPGA. Ключовим аспектом при цьому є вибір ефективних методів навчання та інструментів для їх реалізації, що дозволяють підвищити класифікаційну здатність моделей ШНМ.

Постановка проблеми. Аудіо класифікація, як одна з ключових задач обробки аудіо сигналів, є критично важливою для таких галузей, як розпізнавання мови, музикознавство, системи безпеки, діагностика технічних систем та моніторинг середовища. Однак, не зважаючи на значний прогрес у розвитку алгоритмів глибокого навчання, існує ряд проблем, які обмежують ефективність та універсальність використання сучасних підходів до розпізнавання звуків.

Однією з основних проблем є висока чутливість моделей до шуму та варіацій у вхідних даних. Аудіо дані часто містять фонові шуми, накладення звуків або відображаються в неоднорідних умовах запису. Це ускладнює процес класифікації та вимагає застосування ефективних методів попередньої обробки сигналу.

Іншою проблемою є потреба у великих обсягах якісно маркованих даних для навчання моделей. Збір, анотація та обробка таких даних є трудомісткими та фінансово витратними, особливо для вузькоспеціалізованих завдань. Нерівномірний розподіл даних між класами також може призводити до незбалансованого навчання.

Крім того, виникає питання вибору оптимальної архітектури нейронних мереж та інструментів для конкретних умов їх використання, наприклад, як то мінікомп'ютери систем керування дронами [2]. У різних випадках можуть бути ефективними різні моделі побудови ШНМ, але недостатньо дослідженим залишається питання адаптації цих моделей до умов обмежених обчислювальних ресурсів вбудованих систем.

Таким чином, існує потреба в комплексному аналізі сучасних моделей ШНМ та методів їх навчання для вирішення задач класифікації аудіо на мінікомп'ютерних платформах, що дозволить визначити існуючі обмеження, перспективи та напрямки подальших досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У останні роки нейронні мережі стали основним інструментом для вирішення задач аудіо класифікації. Згорткові, або конволюційні, нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN) широко застосовуються для аналізу спектрограм аудіосигналів, демонструючи високу ефективність у класифікації звуків навколишнього середовища. Наприклад, у роботі [3] досліджено різні архітектури CNN для класифікації аудіо на великомасштабних наборах даних, а у [4] описано використання CNN для класифікації звуків навколишнього середовища, таких як гавкіт собак або шум поїздів, по спектрограмам. У [5] також обговорюється використання попередньо натренованих CNN моделей для аудіо класифікації.

Рекурентні нейронні мережі (RNN), зокрема модифікації на основі довгої короткочасної пам'яті (LSTM) та GRU, ефективно обробляють послідовні дані, що важливо для задач розпізнавання мови та музичних жанрів. У статті [6] розглядається використання RNN для класифікації звуків, зокрема пташиних та жаб'ячих записів. Попри значні досягнення, існують виклики, зокрема нестача маркованих даних для навчання моделей. У статті [7] описано використання RNN для класифікації слухових стимулів з ЕЕГ сигналів, що може бути корисним при роботі з обмеженими наборами даних.

Завдяки здатності враховувати довгострокові залежності в аудіоданих, набувають популярності трансформерні моделі, такі як Audio Spectrogram Transformer (AST), описані у [8].

Мета дослідження. Метою статті є дослідження сучасних методів навчання ШНМ та інструментів їх реалізації на мінікомп'ютерній платформі, що застосовуються для задач аудіо класифікації, з метою визначення їхніх переваг, обмежень та перспектив використання. Стаття спрямована на формування рекомендацій щодо вибору оптимальних підходів для вирішення різних завдань класифікації аудіо, враховуючи специфіку даних, ресурси та можливі виклики.

Порівняльна характеристика моделей ШНМ. Для завдань класифікації використовують багато різних моделей штучних нейронних мереж (ШНМ), але для аудіо класифікації найбільш популярні з них такі, як CNN, RNN, LSTM, GRU [9; 10].

Згорткові, або конволюційні, нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN) є одним із найбільш поширених підходів у нейронних мережах для задач класифікації, зокрема у сфері аналізу візуальних і звукових даних. Їх головна перевага полягає у здатності автоматично виділяти суттєві ознаки з вхідних даних, що робить CNN надзвичайно ефективними для задач, пов'язаних з обробкою складних структур.

Основою роботи CNN є згорткові шари, які виконують операцію згортки над вхідними даними. Під час згортки використовуються спеціальні фільтри (ядра), що ковзають по входу, виділяючи локальні патерни, такі як текстури, межі або частотні компоненти звуку. Для введення нелінійності у модель після кожної згортки застосовується функція

активації, найпоширенішою з яких є ReLU (Rectified Linear Unit). Це дозволяє мережі моделювати складні залежності між ознаками. Щоб зменшити розмірність даних і уникнути перенавчання, у CNN використовуються шари підвибірки (Pooling Layers), найчастіше Max Pooling. Цей метод знижує обчислювальні витрати, вибираючи максимальне значення в локальних областях представлення. На завершальному етапі додаються пов'язані шари (Fully Connected Layers), які об'єднують виділені ознаки для виконання задачі класифікації.

У задачах аудіо класифікації CNN найчастіше використовуються для аналізу спектрограм – двовимірних представлень аудіосигналів, де кожен піксель відображає інтенсивність певної частоти в конкретний момент часу. Це дозволяє CNN ефективно виявляти ключові особливості звукових сигналів, що важливо для класифікації звуків навколишнього середовища, музичних жанрів або мовлення. Однією з переваг CNN є їхня здатність автоматично виділяти ознаки без необхідності попереднього ручного аналізу, що спрощує процес моделювання. Також ці моделі добре масштабуються на великих наборах даних і демонструють високу стійкість до шуму за умови якісного навчання. Однак CNN мають свої обмеження. Вони вимагають великої кількості маркованих даних для ефективного навчання та значних обчислювальних ресурсів, особливо через складність згорткових операцій. Крім того, через локальну природу згорткових шарів CNN можуть бути менш ефективними для задач, де важливі довгострокові залежності. Практичне використання.

Рекурентні нейронні мережі є потужним інструментом для роботи з послідовними даними, такими як аудіосигнали, текст або часові ряди. Головною особливістю RNN є здатність моделювати залежності між елементами послідовності, оскільки вони враховують попередні стани під час обробки кожного наступного елемента. Це досягається завдяки наявності рекурентних зв'язків у мережі, які дозволяють передавати інформацію між вузлами на кожному часовому кроці. Така архітектура робить RNN ефективними для задач, де контекст має велике значення, наприклад, у класифікації аудіосигналів, які змінюються в часі.

Для подолання проблеми затухання градієнтів, яка може виникати під час навчання базових RNN, були розроблені їхні вдосконалені модифікації, такі як LSTM (Long Short-Term Memory) та GRU (Gated Recurrent Unit). Ці моделі мають механізми контролю потоку інформації через спеціальні «ворота», що дозволяє їм запам'ятовувати важливу інформацію протягом тривалих інтервалів часу та ігнорувати менш значущі дані. Завдяки цій властивості LSTM та GRU часто застосовуються у задачах класифікації мовлення, розпізнавання мелодій або аналізу складних звукових сигналів. Також на особливу увагу заслуговує модифікація даного класу моделей глибокого навчання CRNN (Convolutional Recurrent Neural Network), яка поєднує в собі згорткову нейронну мережу (CNN) і рекурентну нейронну мережу (RNN) для обробки послідовних даних.

У задачах аудіо класифікації RNN зазвичай працюють із сирими аудіосигналами або їхніми обробленими представленнями, такими як мел-спектрограми чи послідовності ознак. Їх застосовують, наприклад, для аналізу мови, де важливо зберігати послідовність фонем, або для розпізнавання звуків, де послідовність акустичних подій визначає належність сигналу до певного класу. Проте RNN мають певні обмеження. Вони є складними в обчисленні, особливо на довгих послідовностях, через необхідність виконувати послідовні операції на кожному часовому кроці. Крім того, ефективність RNN значною мірою залежить від налаштувань гіперпараметрів і обсягів навчальних даних.

Трансформери є сучасною архітектурою нейронних мереж, яка кардинально змінила підхід до обробки послідовних даних, зокрема тексту, аудіо та навіть зображень. В основі трансформерів лежить механізм самоуваги (self-attention), який дозволяє кожному елементу послідовності враховувати вплив усіх інших елементів незалежно від їхньої позиції. Це вирішує проблему послідовного обчислення, властиву рекурентним мережам

RNN, і дає можливість обробляти довготривалі залежності в даних значно ефективніше. Завдяки паралельній обробці даних трансформери демонструють високу швидкість роботи та масштабованість навіть на великих наборах даних.

У задачах аудіо класифікації трансформери використовуються для аналізу часових рядів або спектрограм. Наприклад, аудіосигнал розбивається на фрагменти, кожен з яких перетворюється в багатовимірне представлення через ембеддинги. Потім ці представлення проходять через кілька шарів самоуваги, що дозволяє мережі враховувати як локальні, так і глобальні залежності у звукових даних. У кінцевому результаті трансформери виділяють найважливіші ознаки сигналу, які використовуються для класифікації.

Особливістю трансформерів є використання механізму позиційного кодування (positional encoding), який додає інформацію про порядок елементів у послідовності. Це важливо для аудіо аналізу, оскільки відносний порядок частотних чи часових компонентів часто несе критично важливу інформацію. У задачах, таких як розпізнавання мовлення чи класифікація музичних жанрів, трансформери дозволяють моделювати залежності між звуковими подіями, які віддалені одна від одної в часі.

Попри свої переваги, трансформери мають певні обмеження. Вони вимагають значних обчислювальних ресурсів, особливо для роботи з довгими послідовностями, оскільки обчислювальна складність механізму уваги зростає квадратично зі збільшенням довжини вхідних даних. Проте сучасні модифікації, такі як Sparse Transformers та Linformer, частково вирішують цю проблему, зменшуючи обчислювальні витрати без суттєвих втрат точності.

Порівняльна характеристика описаних вище моделей ШНМ наведена в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика CNN, RNN, Трансформерів

Властивість	CNN	RNN	Трансформери
1	2	3	4
Призначення	Найкраще підходять для аналізу двовимірних даних, таких як спектрограми.	Ефективні для роботи з послідовними даними (аудіо, текст).	Оптимальні для задач з довгостроковими послідовностями.
Обробка даних	Приймають спектрограми як вхідні дані.	Працюють напряму із аудіоданими або їхніми ознаками.	Можуть працювати як із спектрограмами, так і з аудіоданими.
Архітектура	Складається зі згорткових шарів, що автоматично виділяють просторові ознаки.	Складається з рекурентних шарів, які зберігають стан для аналізу попередніх елементів послідовності.	Використовують механізм уваги для оцінки важливості всіх елементів послідовності одночасно.
Переваги	- Висока швидкість навчання. - Менша кількість параметрів, ніж у RNN та трансформерів. - Підходять для паралельних обчислень.	- Добре враховують часову динаміку даних. - Підходять для задач, де потрібен аналіз залежностей між елементами.	- Висока ефективність у задачах із довгими послідовностями. - Паралельна обробка даних забезпечує швидке навчання.
Недоліки	- Не враховують часову залежність у сирих даних. - Залежні від попередньої обробки (створення спектрограм).	- Проблема затухаючого градієнта у базових версіях. - Високі витрати обчислювальних ресурсів.	- Висока обчислювальна складність через механізм уваги. - Потребують великих обсягів даних для навчання.
Обчислювальна складність	Низька - підходять для мобільних і вбудованих систем.	Середня - залежить від довжини послідовності.	Висока – особливо на великих наборах даних.
Придатність для шумних даних	Вимагають попередньої обробки для усунення шуму.	Можуть бути чутливими до шуму в даних, потребують очищення.	Стійкіші до шуму завдяки механізму уваги, але залежать від навчальних даних.

Закінчення табл. 1

1	2	3	4
Типові задачі	Класифікація звуків на-вколишнього середовища, розпізнавання музичних жанрів.	Розпізнавання мовлення, аналіз емоцій за голосом, ідентифікація звукових патернів.	Трансляція мовлення, автоматичне розшифрування звуків, класифікація складних послідовностей.
Популярні моделі	ResNet, VGGish, AudioSet, YAMNet	LSTM, GRU, RNN-based Audio Classifiers	WaveNet, Audio Spectrogram Transformer (AST), Perceiver IO
Приклади інструментів	TensorFlow, PyTorch, librosa	Keras, TensorFlow, PyTorch	HuggingFace Transformers, PyTorch, torchaudio

Методика дослідження. Для оцінки продуктивності архітектур нейронних мереж у задачах аудіо класифікації на мінікомп’ютері NVIDIA Jetson Nano, що входить до складу системи керування захисного дрона, було обрано налаштування оточення, наведено нижче. Етапи дослідження включали:

1. Збір та вибір відповідного аудіодатасету для задачі. Для дослідження було обрано датасет UrbanSound8K [11], оскільки він має записи, які розподілено по 10 класів, що добре підходить для тестування швидкодії архітектур у задачах аудіокласифікації.

2. Обробка сирих аудіофайлів для підготовки до тренування моделі. Це включає такі кроки, як нормалізація, отримання спектрограм. Для CNN та трансформерів з аудіоданих було отримано MEL-спектрограми. Для RNN було отримано MFCC.

3. Розподіл на тренувальну, валідаційну та тестову вибірки.

4. Навчання моделей на платформі Jetson Nano. Було обрано стандартні моделі ResNet-18, на основі GRU та Audio Spectrogram Transformer для CNN, RNN та трансформерів, відповідно. Модель на основі GRU має архітектуру, яка складається зі 100 нейронів в першому шарі GRU, регуляризації Dropout в 0.5 і вихідним шаром з 10 нейронами для 10 різних класів з сигмоїдною активаційною функцією. Всі моделі налаштовано на класифікацію за 10 класами.

5. Оптимізація моделей. Для оптимізації було обрано Nvidia TensorRT для покращення швидкодії. Також використовуються 128 вбудованих CUDA ядер.

6. Оцінка продуктивності моделей. Вимірювання результатів роботи моделей за такими критеріями, як точність класифікації, швидкість обробки до та після оптимізації, використання ресурсів та енергоефективність.

Визначення вхідних даних для експериментів. Для задачі аудіо класифікації звуків БПЛА вибір відповідного набору даних є критичним етапом, оскільки він визначає якість навчання моделі. Для формування тренувального, валідаційного та тестового набору даних були використані набори даних які є в публічному доступі [12; 13]. У цих наборах даних міститься три основні класи аудіосигналів: звук руху дрона Parrot Mambo, звук руху дрону Parrot Bebop та інші звуки, що не є звуками дронів.

Аудіофайли з обраних наборів даних були переконвертовані в аудіофайли з однаковими параметрами. Параметри звукових файлів що входять до тренувального, валідаційного та тестового набору даних наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Параметри аудіофайлів з датасету

Частота дискретизації	Бітрейт	Кількість каналів	Формат аудіофайлу
16 КГц	16 КБ/с	моно	wav

Для дослідів було проведено розділення конвертованих аудіофайлів на кілька менших сегментів аудіофрагментів, що дозволило алгоритму глибокого навчання вивчати ознаки більш точно в порівнянні з подачею всього запису одночасно. Іншою метою сегментації була оптимізація навчання моделі для розгортання в режимі реального часу, де критичним є час, необхідний для виявлення та ідентифікації.

За основу для визначення впливу розміру аудіосегмента на загальну продуктивність було взято експериментальні дані з [12], де міститься інформація щодо різних розмірів сегментів, таких як одна секунда, дві секунди та п'ять секунд, при чому сегментація на одну секунду перевершує по ефективності інші часові інтервали.

Хоча такий підхід може призвести до втрати деяких ознак з оригінальних аудіофрагментів, на момент проведення експериментів цей метод був єдиним доступним з практично перевірених методів для глибокого навчання на аудіовході з конвертацією аудіофрагментів у спектрограми. Різноманітні ознаки потім обчислюються з отриманих спектрограм алгоритмом навчання. На рис. 1 представлено приклад спектрограми аудіофрагмента тривалістю одна секунда, що містить звук дрона та аудіофрагмент випадкового шуму, такого як звук друкування.

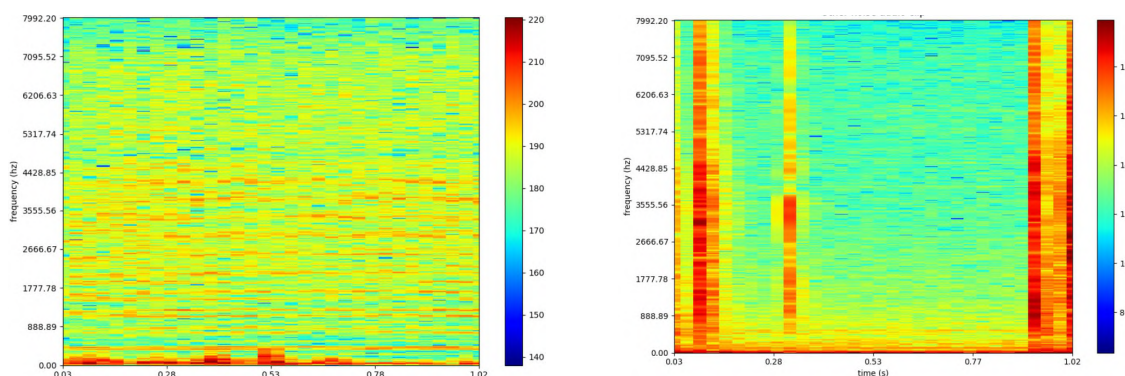


Рис. 1. Спектрограми сегмента зі звуком дрона та випадкового шуму

Для реалізації кожної з моделей CNN, RNN та CRNN було використано відкритий код, доступний у [14], який був модифікований відповідно до завдань даного дослідження. Проте треба зазначити, що код в [14] – це покращена версія прикладу розпізнавання аудіо з використанням бібліотеки TensorFlow, який наводиться в [15].

Реалізація моделі на основі CNN архітектури. Модель CNN дозволяє ефективно аналізувати аудіодані у вигляді спектрограм. Завдання моделі полягало у класифікації звуку по трьох категоріях: дрон Мамбо, дрон Вебор та інші звуки.

У процесі дослідження використовувалась конволюційна модель ШНМ аудіорозпізнавання з CNN архітектурою, представленою на рис. 2.

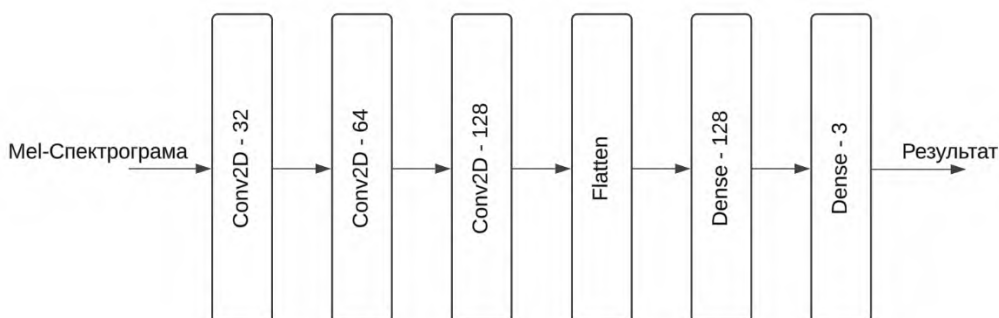


Рис. 2. Архітектура моделі на основі CNN

Перший конволюційний шар в 32 нейрони, який отримує дані у вигляді MEL-спектрограм, виявляє локальні патерни у спектрограмі, такі як особливі частоти чи періодичності. ReLU допомагає моделі вчитися нелінійним залежностям, усуваючи негативні значення. У цьому шарі створюється 32 вихідні карти ознак, кожна з яких відповідає певному фільтру. Також використовується шар пулінгу MaxPooling, який:

- зменшує розмірність вихідних даних, скорочуючи їх у 2 рази (з 128×128 до 64×64);

- видаляє шум, залишаючи найважливіші ознаки, що були виявлені конволюційними фільтрами;
- зменшує обчислювальні витрати, зберігаючи головну інформацію.

Другий конволюційний шар в 64 нейрони знаходить складніші ознаки на основі вхідних даних із першого шару пулінгу. На даному шарі збільшується кількість фільтрів, оскільки модель починає навчатися більш детальним характеристикам, таким як поєднання частот чи перехідні процеси в спектрограмі. Ще один шар пулінгу зменшує розмір вихідних даних із 64×64 до 32×32 та знижує ризик перенавчання, зменшуючи розмірність, але залишаючи найважливіші ознаки.

Третій конволюційний шар в 128 нейронів знаходить високорівневі ознаки, такі як складні патерни в спектрограмі, які можуть бути характерними для звуків дронів, оскільки на цьому етапі модель потребує більше потужності для аналізу комплексних характеристик, збільшується кількість фільтрів. Останній шар пулінгу зменшує розмір вихідних даних із 32×32 до 16×16 .

Шар згортання перетворює двовимірні карти ознак в одновимірний вектор, що підготовляє дані для передачі в повнозв'язні шари. Повнозв'язні шари складаються з першого шару, який виявляє залежності між високорівневими ознаками та забезпечує моделі можливість виконувати більш складні класифікаційні завдання; та другого шару, який перетворює вихідні значення у ймовірності для кожного класу.

Результати навчання даної моделі наведено на рисунку 3.

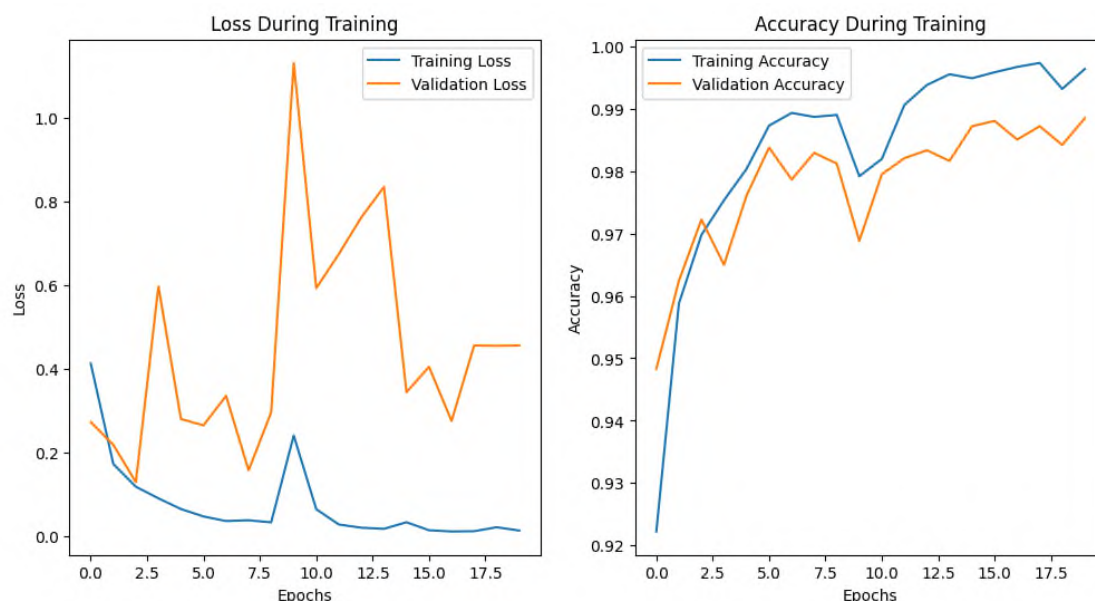


Рис. 3. Результат навчання моделі CNN

Під час навчання моделі тренувальна втрата поступово знижується, що вказує на ефективне навчання моделі. Валідаційна втрата має значні коливання, особливо на початку навчання, але згодом стабілізується. Це може свідчити про можливе перенавчання, яке вдалося уникнути до кінця епох. Тренувальна точність поступово зростає і досягає високих значень, що вказує на те, що модель добре "запам'ятала" тренувальні дані. Валідаційна точність також демонструє хороші результати, досягаючи 98-99%. Це свідчить про те, що модель здатна узагальнювати знання на нових даних, хоча деякі коливання можуть вказувати на невеликі проблеми з узагальненням.

Результати тестування моделі наведено в табл. 3.

Таблиця 3 - Результати тестування моделі CNN

Клас	Точність, %	Відклик	F-міра
Mambo	93	0,90	0,91
Вебор	96	0,95	0,96
Інші звуки	99	1	1

Під час тестування моделі метрики F-міри для всіх класів перевищують 0.90, що підтверджує гарний баланс між точністю та відкликом.

Реалізація моделі на основі GRU архітектури. Рекурентна нейронна мережа (GRU) була побудована для класифікації аудіозаписів у три класи: дрон Mambo, дрон Вебор та інші звуки, що не є дронами. Модель використовує часові ряди характеристик звуку, таких як мел-кепстральні коефіцієнти (MFCC), для виявлення звукових патернів, що характерні для кожного класу.

Було створено модель RNN з архітектурою, представленою на рис. 4.

Перший GRU шар у 128 нейронів зберігає залежності між часовими кроками в даних і повертає повну послідовність, щоб наступний шар GRU міг обробляти весь часовий ряд. На цьому кроці використовується стандартна активація для GRU та регуляризація, яка випадковим чином відключає 30 % нейронів у шарі GRU під час навчання для запобігання перенавчанню.

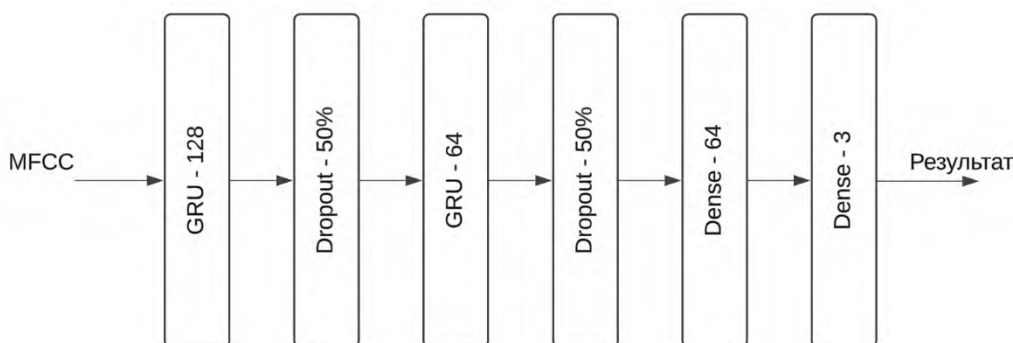


Рис. 4. Архітектура моделі на основі GRU

Другий GRU шар в 64 нейрони зменшує розмірність послідовності та надає більш узагальнені патерни. Він повертає лише останній стан GRU, представляючи всю послідовність у вигляді одного вектора. Також використовується регуляризація для другого GRU шару, яка запобігає перенавчанню.

Повнозв'язний шар з 64 шарами та вихідний повнозв'язний шар з 3 шарами, що є вихідним шаром для класифікації, повертає ймовірності належності до кожного з трьох класів. Використовується функція активації Softmax для інтерпретації виходів як ймовірностей.

Під час навчання моделі втрати на тренувальних даних поступово знижуються, як це представлено на рисунку 4, що свідчить про успішне навчання моделі. Валідаційні втрати коливаються після 5-ї епохи, що може свідчити про невелике перенавчання моделі на тренувальних даних. Тренувальна точність поступово зростає, досягаючи значення близько 99%. Валідаційна точність також зростає, але дещо повільніше і стабілізується на рівні близько 96–97%. Це свідчить про хорошу узагальнюючу здатність моделі.

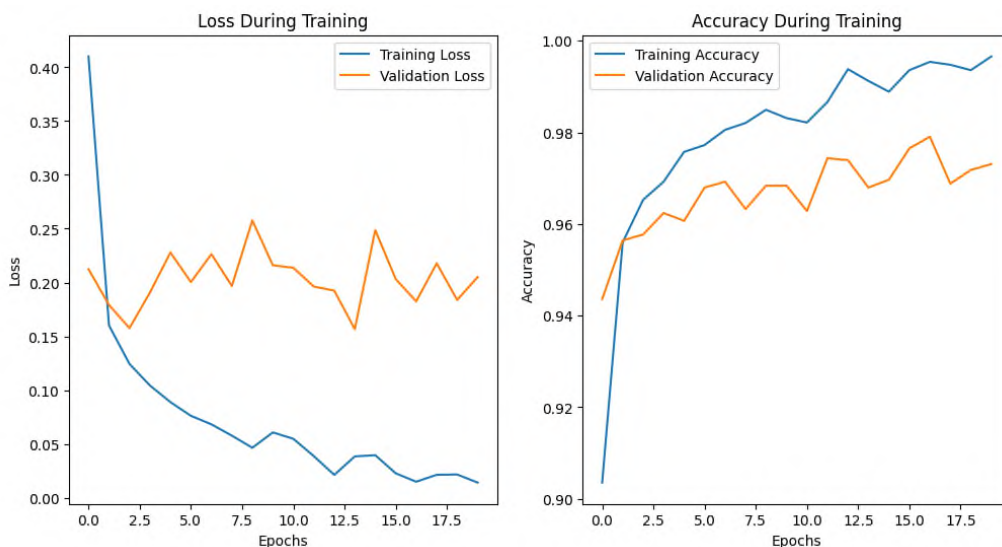


Рис. 4. Результати навчання моделі GRU

Під час тестування моделі точність класифікації звуків дронів Mambo і Вебор дещо нижча відносно інших моделей, що може бути спричинено недостатньою кількістю тренувальних даних для кожного з цих класів. Спостерігається певне перенавчання моделі, що виражається в коливанні валідаційних втрат. Результати тестування моделі GRU представлені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Результати тестування моделі на основі GRU

Клас	Точність, %	Відклик	F-міра
Mambo	83	0,83	0,83
Вебор	83	0,94	0,88
Інші звуки	99	0,98	0,99

Результати показують, що модель на основі GRU здатна класифікувати звуки дронів і розпізнавати інші звуки з достатньою точністю. Однак якість класифікації звуків класів Mambo і Вебор потребує покращення. Це може бути досягнуто за рахунок збільшення розміру датасету, оптимізації моделі та застосування додаткових технік обробки даних.

Реалізація моделі LSTM архітектури. Дана модель аудіокласифікації спеціально адаптована для роботи з часовими рядами, такими як аудіодані. Вона використовує мел-кепстральні коефіцієнти (MFCC) як вхідні ознаки, що дозволяє ефективно виділяти важливу інформацію з аудіозаписів. Архітектуру створеної моделі LSTM представлено на рис. 5.

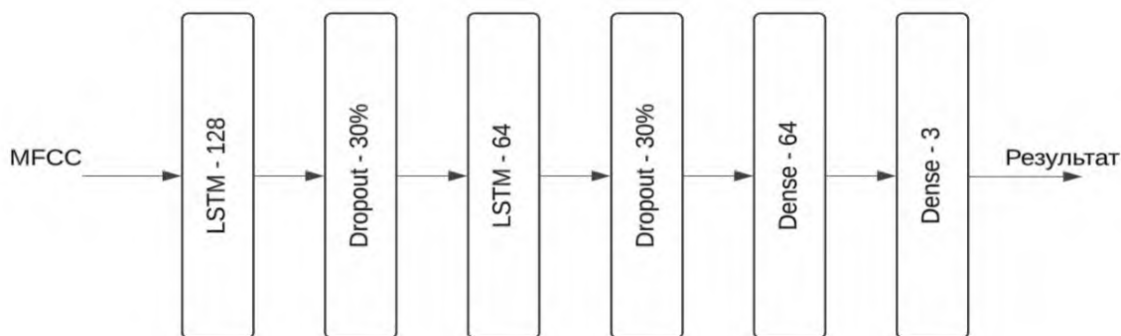


Рис. 5. Архітектура моделі LSTM

Перший шар із 128 нейронів аналізує кожен часовий крок і виділяє довготривалі залежності в аудіосигналі. Застосовується Dropout (0.3), щоб уникнути перенавчання. Він

передає повну послідовність виходів до наступного шару. Шар із 64-ма LSTM нейронів передає лише остаточний вихід до наступного шару. Цей шар конденсує інформацію, отриману від попереднього шару, у компактне представлення. Застосовується Dropout (0.3). Останніми шарами є два шари, перший з яких повнозв'язний шар з 64 нейронами та функцією активації relu. Цей шар обробляє вектор ознак, виділений LSTM-шарами. Другий вихідний шар із трьома нейронами та функцією активації softmax формує ймовірності для кожного з трьох класів.

Під час навчання моделі і тренувальна, і валідаційна втрати поступово зменшуються до стабільних значень, як це показано на рис. 6.

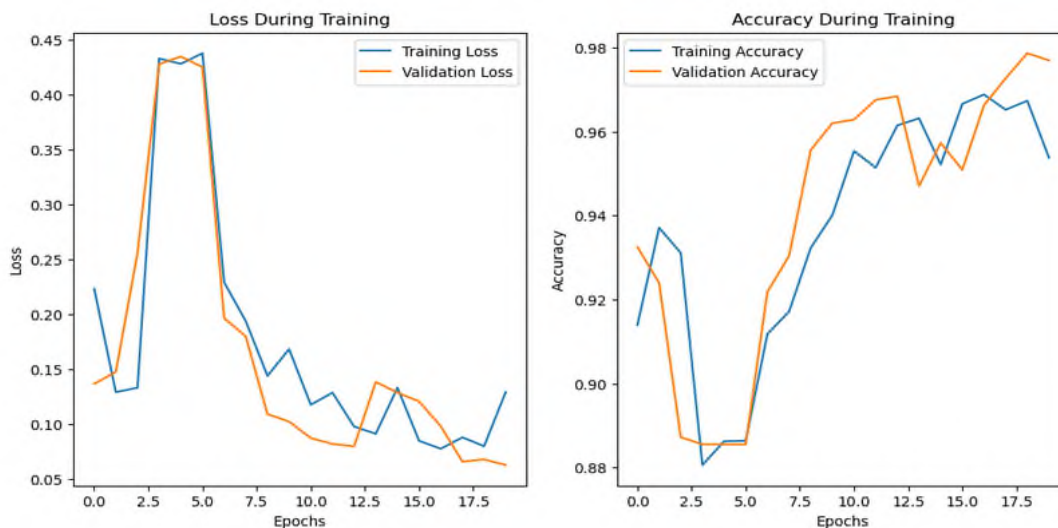


Рис. 6. Результати навчання моделі LSTM

Значення втрат для тренувального і валідаційного набору є близькими, що свідчить про відсутність перенавчання. Для перших кількох епох спостерігається нестабільність втрат, що є типовим для рекурентних моделей при роботі з часовими рядами. Точність для тренувальних і валідаційних даних зростає до 98 %. Тренувальна і валідаційна точності мають схожу динаміку, що свідчить про ефективне навчання без значного перенавчання.

Під час тестування, результати якого представлені у таблиці 5, для класів Mambo і Вебор результати були високі, хоча відклик для класу Mambo (0.71) свідчить про можливість пропуску частини цього класу. Загалом модель добре узагальнює дані і здатна класифікувати звуки трьох класів з високою ефективністю.

Таблиця 5 – Результати тестування моделі LSTM мережі

Клас	Точність, %	Відклик	F-міра
Mambo	92	0,71	0,80
Вебор	92	0,94	0,93
Інші звуки	98	1,00	0,99

Реалізація моделі на основі CRNN. Гібридна модель CRNN поєднує потужність конволюційних мереж CNN для виділення просторових ознак і рекурентних нейронних мереж, а саме LSTM, які аналізують часову структуру звукових даних. Ця архітектура дозволяє ефективно працювати з мел-спектрограмами – часово-частотними представленнями звуку. Модель було створено за архітектурою, представленою на рис. 7.

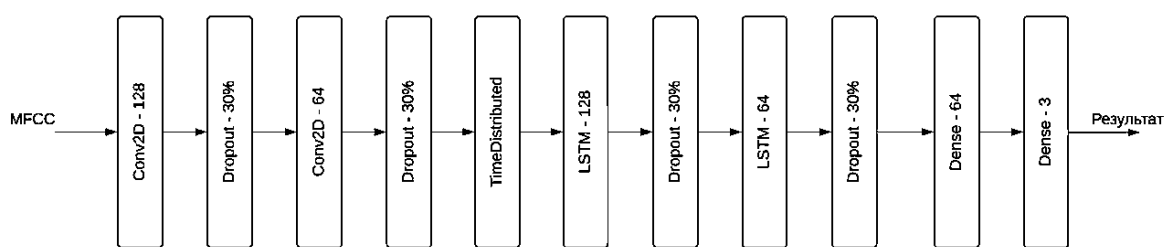


Рис. 7. Схема архітектури гібридної моделі на основі CNN та LSTM

У CNN частині використовуються фільтри розміром 3×3 для виявлення локальних патернів у спектрограмах (наприклад, гармоніки або частотні ряди). Вихідні дані кожного фільтру нормалізуються, зменшуючи ризик перенавчання і прискорюючи навчання. Просторовий розмір спектрограми скорочується для зменшення обчислювальної складності, залишаючи найважливіші ознаки. Після обробки в CNN результати перетворюються для передачі до рекурентної частини.

RNN частина, що складається з двох шарів LSTM (128 та 64 вузли). Перша LSTM (128) аналізує часові залежності у вхідних ознаках, при цьому забезпечується передача повної часової послідовності до наступного шару. Використовується Dropout (0.3) регуляризація для уникнення перенавчання. Друга LSTM (64) завершує аналіз часових залежностей, повертаючи лише остаточний.

Вихідна частина також складається з двох шарів: Dense (64 вузли, ReLU) забезпечує інтеграцію ознак із попередніх шарів для підготовки до класифікації, а Dense (3 вузли, Softmax) – це фінальний класифікатор на три класи.

Результати навчання моделі наведено на рис. 8, а результати тестування представлені в табл. 6.



Рис. 8. Результати навчання гібридної моделі на основі CNN та LSTM

Як видно з рис. 10, спостерігається плавне зниження тренувальної втрати з кожною епохою, що свідчить про поступове навчання моделі. На етапах від 6 до 10 епох валідаційна втрата показує значні коливання, що свідчить про нестабільність моделі в узагальненні даних. Після 15 епох валідаційна втрата стабілізується та стає співмірною з тренувальною втратою. Незначні коливання валідаційних втрат можуть свідчити про те, що модель могла трохи перенавчитися на певних етапах, але після стабілізації вона демонструє адекватне узагальнення.

Таблиця 6 – Результати тестування гібридної моделі на основі CNN та LSTM

Клас	Точність, %	Відклик	F-міра
Mambo	83	0,76	0,78
Bebor	85	0,73	0,82
Інші звуки	92	0,93	0,90

Під час тестування (табл. 6) модель показала результати, які підтверджують її здатність ефективно класифікувати звуки. Однак результати для класів дронів Mambo і Bebor потребують покращення.

Реалізація моделі на основі архітектури трансформера. Модель для аудіокласифікації на основі трансформера ефективно працює з послідовними даними. Ця модель використовує механізм самоуваги (self-attention) для врахування довготривалих залежностей у вхідних даних. Архітектура моделі трансформера представлена на рис. 9.

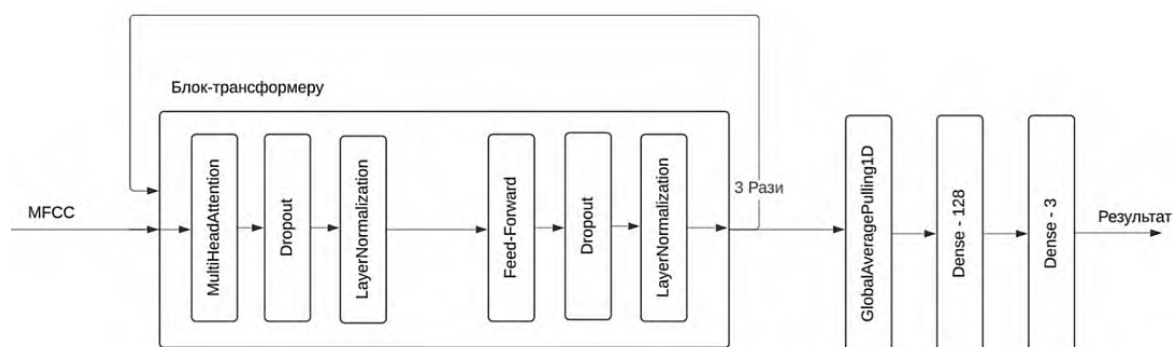


Рис. 9. Схема архітектури моделі трансформера

У цій моделі вхідний шар очікує на послідовність ознак, які отримані після попередньої обробки аудіо у вигляді MFCC. Механізм MultiHeadAttention - це ключовий компонент трансформера, який дозволяє моделі зважувати вплив різних частин послідовності одна на одну. Він використовує декілька "голів" уваги (Multi-head), щоб паралельно обчислювати різні аспекти залежностей між елементами послідовності. Шари нормалізації (LayerNormalization), застосовуються після кожного кроку обчислення самоуваги та повнозв'язного шару. Вони допомагають стабілізувати навчання та прискорити його. Повнозв'язні Feed-Forward шари які забезпечують нелінійність, обчислюючи проміжні ознаки, складається з двох послідовних шарів: один для збільшення розмірності, а інший — для її зменшення до початкової. Глобальний шар агрегації (GlobalAveragePooling1D) узагальнює інформацію з усього тимчасового контексту, зводячи послідовність до одного вектора. Вихідний шар складається з повнозв'язного шару з функцією активації softmax. Цей шар забезпечує прогноз ймовірностей належності до одного з трьох класів (дрон типу Mambo, дрон типу Bebor, інші звуки).

Наведена модель трансформера навчалася протягом 20 епох, що дозволило досягти високих результатів точності та низьких втрат, як це видно з графіків на рис. 10. Під час навчання втрати зменшувалися стабільно, починаючи з початкового значення близько 0,12, досягнувши мінімального значення менше 0.02. Валідаційна втрата демонструє певні коливання, але в цілому підтримує низькі значення, що свідчить про ефективну генералізацію моделі. Навчальна точність зросла до 99%, що свідчить про те, що модель добре адаптується до навчальних даних. Валідаційна точність також знаходиться на рівні 99%, що підтверджує високу якість моделі на валідаційних даних.

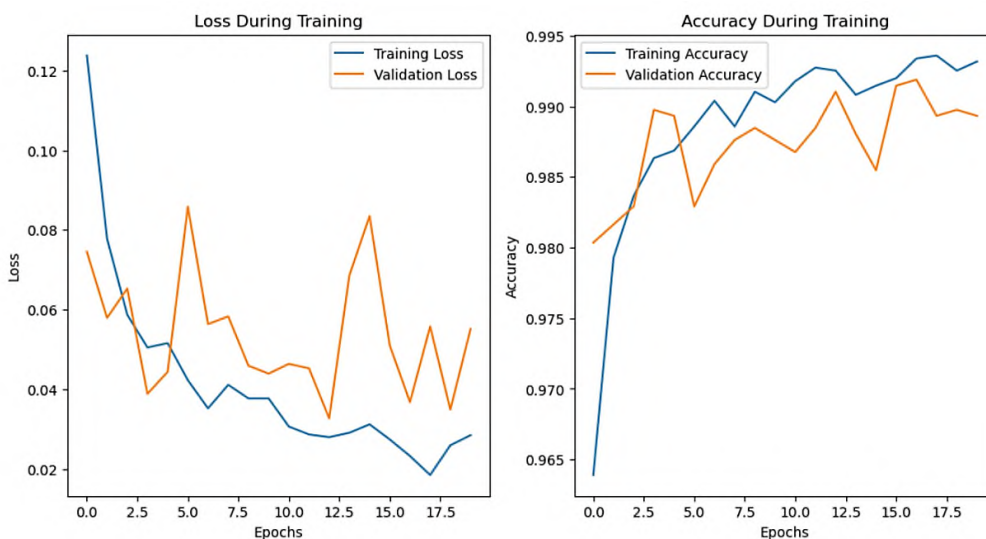


Рис. 10. Результати навчання моделі на основі трансформера

Тестування моделі проводилося на вибірці даних, яка не використовувалася в навчанні або валідації. Модель демонструє показники для трьох класів, які наведено в табл. 7.

Таблиця 7 – Результати тестування моделі на основі трансформера

Клас	Точність, %	Відклик	F-міра
Mambo	97	0,93	0,95
Вєбор	95	0,95	0,95
Інші звуки	99	1,00	0,99

Модель на основі трансформера показує стабільну продуктивність з точністю класифікації понад 95 % для всіх класів. Високі значення F-міри свідчать про ефективність моделі у врахуванні як точності, так і відклику. Це робить модель придатною для завдань аудіокласифікації в умовах реального часу, таких як виявлення дронів у шумовому середовищі.

Аналіз результатів дослідження.

Результати порівняльного аналізу досліджених ШНМ при вирішенні задачі аудіо класифікації наведено в таблиці 8.

Таблиця 8 – Результати аналізу архітектур ШНМ при аудіо класифікації

Модель	Час обробки до оптимізації, мс	Час обробки після оптимізації, мс	Точність, %	Використання пам'яті GPU, МБ	Енергоспоживання, Вт
CNN	42	17	89.3	256	6
GRU	81	30	85	512	7.7
AST	125	55	92	1024	9

CNN демонструють високу ефективність у виділенні локальних частотних ознак з аудіосигналів, таких як спектральні патерни або гармоніки. Вони є особливо корисними для задач, де звуки мають виразні частотні характеристики, наприклад, шум моторів дронів.

RNN, включаючи їх модифікації (LSTM, GRU), спеціалізуються на обробці послідовних даних, таких як аудіосигнали. Вони здатні враховувати часові залежності, що є критичним для звуків дронів, де важливий контекст змін частот.

Поєднання CNN і RNN в моделі трансформера дозволяє використовувати сильні сторони обох архітектур: CNN виявляє локальні ознаки з аудіоданих, а RNN аналізує їх часовий контекст. Це забезпечує високу точність і універсальність трансформерів для задач аудіокласифікації. До того ж використовуючи механізм уваги, вони дозволяють ефективно моделювати як локальні, так і глобальні залежності в сигналі. Вони мають високу масштабованість і здатність обробляти великі набори даних.

Висновки. На основі проведеного аналізу ШНМ для задач аудіо класифікації встановлено, що використання різних архітектур, таких як CNN, RNN та трансформери, дозволяє досягти високої ефективності для специфічних задач класифікації аудіосигналів. Для оптимального вирішення завдань, пов'язаних з обробкою аудіо на обмежених обчислювальних ресурсах, рекомендовано застосовувати комбіновані підходи, що враховують переваги кожної архітектури.

Використання платформи NVIDIA Jetson Nano забезпечує ефективну реалізацію обчислювальних задач для нейронних мереж, завдяки підтримці оптимізованих бібліотек та можливості роботи з паралельними обчисленнями.

Результати тестування нейронних мереж на Jetson Nano демонструють високу ефективність, зокрема моделі CNN, яка забезпечує швидкість обробки та точність понад 90 % навіть для обмежених обчислювальних ресурсів. Завдяки оптимізації за допомогою Nvidia TensorRT досягнуто зменшення часу обробки даних на 50 %.

Подальші дослідження передбачають адаптацію запропонованих моделей для роботи в умовах реального часу, інтеграцію додаткових джерел даних, таких як візуальні сигнали, та вдосконалення алгоритмів обробки аудіо для підвищення стійкості до шумів та інших викликів, характерних для реальних середовищ.

Список використаних джерел

1. Хома, Ю. В. Порівняльний аналіз програмно-апаратного забезпечення алгоритмів глибокого навчання / Ю. В. Хома, А. Я. Бенч // Комп'ютерні системи і мережі. – 2019. – Т.1. – № 1. – С. 97-102.
2. Казимир, В. В. Проектування системи керування дрона у складі захисної мультиагентної системи / В. В. Казимир, А. І. Роговенко, О. О. Карась // Технічні науки та технології. – 2024. – № 2(36). – С. 102-115.
3. Hershey, S. CNN architectures for large-scale audio classification / S. Hershey [et al.] // 2017 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (icassp). – IEEE, 2017. – С. 131-135.
4. Palanisamy, K. Rethinking CNN models for audio classification [Electronic resource] / K. Palanisamy, D. Singhania, A. Yao. – Accessed mode: <https://arxiv.org/pdf/2007.11154.pdf>.
5. Gong Y. AST: Audio Spectrogram Transformer [Electronic resource] / Yuan Gong, Yu-An Chung, James R. Glass // arXiv.org. – 2021. – Accessed mode: <https://arxiv.org/abs/2104.01778>.
6. Nandi P. Recurrent Neural Nets for Audio Classification [Electronic resource] / Papiya Nandi // Medium. – 2024. – Accessed mode: <https://towardsdatascience.com/recurrent-neural-nets-for-audio-classification-81cb62327990>.
7. Moynereau, M. A. Classification of auditory stimuli from EEG signals with a regulated recurrent neural network reservoir / Marc-Antoine Moynereau, Thomas Brienne, Simon Brodeur, Jean Rouat, Kevin Whittingsta, Eric Plourde // arXiv.org. – 2018. – Accessed mode: <https://arxiv.org/pdf/1804.10322>.
8. Yuan Gong. AST: Audio Spectrogram Transformer / Yuan Gong, Yu-An Chung, James R. Glass // INTERSPEECH 2021 30 August – 3 September, 2021, Brno, Czechia. – Pp. 571- 575.
9. Ramzan, F. A Deep Learning Approach for Automated Diagnosis and Multi-Class Classification of Alzheimer's Disease Stages Using Resting-State fMRI and Residual Neural Networks / F. Ramzan, M. U. Khan, A. Rehmat, S. Iqbal, T. Saba, A. Rehman, Z. Mehmood // Journal of Medical Systems. – 2019. – Vol. 44(2). DOI:10.1007/s10916-019-1475-2.
10. Liu, Y. A Convolutional Recurrent Neural-Network-Based Machine Learning for Scene Text Recognition Application / Yiyi Liu, Yuxin Wang, Hongjian Shi // Symmetry. – 2023. – Vol. 15, № 4. – P. 849. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym15040849>.
11. Papers with Code - UrbanSound8K Dataset [Electronic resource] // The latest in Machine Learning : Papers With Code. – Accessed mode: <https://paperswithcode.com/dataset/urbansound8k-1>.
12. Piczak, K. J. ESC: Dataset for Environmental Sound Classification / K. J. Piczak // Proceedings of the 23rd Annual ACM Conference on Multimedia, Brisbane, Australia: ACM Press, Oct. 13, 2015. – Pp. 1015–1018. – Accessed mode: <https://www.karolpiczak.com/papers/Piczak2015-ESC-Dataset.pdf>.
13. Al-Emadi, S. Saraalemadi/DroneAudioDataset [Electronic resource] // GitHub. – (2018). – Accessed mode: <https://github.com/saraalemadi/DroneAudioDataset>.
14. Zhang, Y. Hello Edge: Keyword Spotting on Microcontrollers [Electronic resource] / Y. Zhang, N. Suda, L. Lai, V. Chandra // arXiv.org. – Accessed mode: <https://arxiv.org/abs/1711.07128>.
15. 2018. [Online]. Available: <https://www.tensorflow.org/tutorials/sequences/audiorecognition>.

References

1. Khoma, Yu.V., Bench, A.Ya. (2019). Porivnialnyi analiz prohramno-aparatnoho zabezpechennia alhorytmiv hlybokoho navchannia [Comparative analysis of software and hardware of deep learning algorithms]. *Kompiuterni systemy i merezhi – Computer systems and networks*, 1(1), 97-102.
2. Kazymyr, V.V., Rohovenko, A.I., Karas, O.O. (2024). Proiektuvannia systemy keruvannia drona u skladi zakhysnoi multyahentnoi systemy [Designing a drone control system as part of a protective multi-agent system]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 2(36), 102-115.
3. Hershey, S. et al. (2017). CNN architectures for large-scale audio classification. *2017 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (icassp)* (pp. 131-135).
4. Palanisamy, K., Singhania, D., Yao, A. (2020). Rethinking CNN models for audio classification. *arxiv.org*. <https://arxiv.org/abs/2007.11154>.
5. Gong, Y., Chung, Y., & Glass, J.R. (2021). AST: Audio Spectrogram Transformer. *www.isca-archive.org*. https://www.isca-archive.org/interspeech_2021/gong21b_interspeech.pdf.
6. Nandi, P. (2024). Recurrent Neural Nets for Audio Classification. *towardsdatascience.com*. <https://towardsdatascience.com/recurrent-neural-nets-for-audio-classification-81cb62327990>.
7. Moinnereau, M. A., et al. (2018). Classification of auditory stimuli from EEG signals with a regulated recurrent neural network reservoir. *arxiv.org*. <https://arxiv.org/abs/1804.10322>.
8. Gong, Y., Chung, Y., & Glass, J.R. (2021). AST: Audio Spectrogram Transformer. *INTERSPEECH 2021*. 30 August – 3 September, 2021. Brno, Czechia (pp. 571-575).
9. Ramzan, F., Khan, M. U., Rehmat, A., Iqbal, S., Saba, T., Rehman, A., Mehmood, Z. (2019). A Deep Learning Approach for Automated Diagnosis and Multi-Class Classification of Alzheimer's Disease Stages Using Resting-State fMRI and Residual Neural Networks. *Journal of Medical Systems*, 44. doi:10.1007/s10916-019-1475-2.
10. Liu, Y., Wang, Y., Shi, H. A (2023). Convolutional Recurrent Neural-Network-Based Machine Learning for Scene Text Recognition Application. *Symmetry*, 15(4), 849.
11. Salamon, J., et al. (2024). Urbansound8k. *paperswithcode.com*. <https://paperswithcode.com/dataset/urbansound8k-1>.
12. Piczak, K. J. (2015). ESC: Dataset for Environmental Sound Classification. *Proceedings of the 23rd Annual ACM Conference on Multimedia*, Brisbane, Australia: ACM Press, Oct. 13. (pp. 1015–1018). <https://www.karolpiczak.com/papers/Piczak2015-ESC-Dataset.pdf>.
13. Al-Emadi, S. (2018). Saraalemadi/DroneAudioDataset. <https://github.com/saraalemadi/DroneAudioDataset>.
14. Zhang, Y., Suda, N., Lai, L., and Chandra, V. (2017). Hello edge: Keyword spotting on microcontrollers. *arxiv.org*. <http://arxiv.org/abs/1711.07128>.
15. 2018. [Online]. Available: https://www.tensorflow.org/tutorials/sequences/audio_recognition.

Отримано 21.12.24

UDC 004.2

Volodymyr Kazymyr¹, Andrii Rohovenko², Oleksii Karas³

¹ Doctor of Sciences, Professor, Professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vkazymyr@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119>. **ResearcherID:** [Q-2925-2016](https://orcid.org/0000-0001-8163-1119)

² PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: arogovenko@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4594-5692>. **ResearcherID:** [G-3926-2014](https://orcid.org/0000-0003-4594-5692)

³ student of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: oleksiykaras2016@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-8862-7234>. **ResearcherID:** [JZT-2594-2024](https://orcid.org/0009-0004-8862-7234)

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR AUDIO CLASSIFICATION ON AN EMBEDDED PLATFORM

The paper investigates the application of state-of-the-art artificial neural networks (ANNs) for audio classification tasks on embedded systems, specifically the NVIDIA Jetson Nano. The authors focus on evaluating the performance of Convolutional Neural Networks (CNNs), Recurrent Neural Networks (RNNs), and Transformers in classifying unmanned aerial vehicle (UAV) noise.

Key challenges in this domain, such as high levels of noise and variability in input data, limited labeled audio datasets, and the need to adapt ANNs to resource-constrained embedded systems, are discussed.

The study delves into the architectural characteristics of these ANN models, highlighting the strengths of CNNs for spectrograms, RNNs with LSTM and GRU for sequential data, and Transformers for their ability to handle long-range dependencies.

A methodology for implementing these models on the Jetson Nano platform is proposed, considering its hardware constraints.

Experimental results demonstrate the effectiveness of different architectures for UAV noise classification, with CNNs excelling in spectrogram analysis, while RNNs and Transformers proving more suitable for raw audio or sequential feature processing.

The authors outline directions for future research, including the development of optimised training methods for small datasets and the adaptation of advanced noise classification approaches to resource-constrained platforms.

Recommendations are provided for selecting the appropriate architecture based on task-specific requirements and constraints.

Keywords: artificial neural networks, audio classification, embedded systems, NVIDIA Jetson Nano, UAV.

Fig.: 10. Table: 8. References: 15.

**Олексій Васильович Красножон¹, Андрій Васильович Красножон²,
Андрій Віталійович Димерець³, Артем Вікторович Сигута⁴**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: wingcommander2011@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2500-254X>

Scopus Author ID: 57190377188

²кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: red_john@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6215-7535>. Scopus Author ID: 57191825825

³аспірант кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки, група АСД-122-22
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: andrey.dymerets@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7617-5291>. Scopus Author ID: 57204287360

⁴аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем, група АСД-122-22

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: syguta@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8328-1277>

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ВИЯВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ПРЕДМЕТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТАЛОШУКАЧА ІНДУКТИВНОГО ТИПУ

Відомо, що на сьогодні задача пошуку металевих об'єктів, що знаходяться в землі або приховані за іншими перешкодами, вирішується за допомогою металошукачів або металодетекторів. Тривалий досвід їх експлуатації призвів до появи різноманітних видів і класів металошукачів, які відрізняються як самими параметрами, так і кількістю котушок та їх геометричними формами.

Метою написання цієї статті є побудова комп'ютерної моделі виявлення металевих об'єктів за допомогою найпоширенішого типу металодетекторів: одноконтурних резонансних індукційного типу. Як датчики виявлення об'єктів використовується система котушок індуктивності типу Double D.

У статті описано процес створення моделі та її налаштування засобами середовища COMSOL Multiphysics. У результаті застосування моделі було отримано залежності напруги, що наводиться в прийомній котушці системи, при переміщенні алюмінієвого об'єкта вздовж горизонтальної і вертикальної вісей системи, а також від діаметра і товщини самого об'єкта, який має циліндричну форму. Наведено залежність напруги, що наводиться у прийомній котушці та різниці фаз між струмами котушок від питомої електричної провідності об'єкта-мішені.

На основі отриманих залежностей було проведено оцінювання потенційної можливості гарантованого детектування алюмінієвого об'єкту системою котушок, а також надано пояснення щодо обмежень, які виникають.

Зроблено висновки стосовно можливих шляхів застосування отриманої математичної моделі, а також переваг, отриманих від її застосування.

Ключові слова: комп'ютерна модель; металошукач; індуктивність; система котушок double D; COMSOL Multiphysics; магнітне поле; радіус об'єкта.

Рис.: 8. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Проблема ефективного пошуку різноманітних металевих предметів цікавить людство вже досить давно, особливо тих, що приховані під шаром ґрунту або замасковані відповідним чином. Саме для вирішення такого класу задач і створюються металошукачі або металодетектори. Однак, вирішення цієї проблеми може бути важливим не тільки для шукачів старовинних предметів та археологів, а і для пошуку вибухонебезпечних предметів, оскільки переважна більшість снарядів, мін і бомб мають металевий корпус, а також внутрішні механізми. Як зазначалося в [1], останнє твердження є дуже важливим, особливо в сучасних умовах повномасштабної війни, у яких перебуває Україна.

Постановка проблеми. Одними з найпоширеніших на сьогодні за співвідношенням ціна/якість виявлення є одноконтурні резонансні металошукачі індукційного типу. Робота такого пристрою базується на вимірюванні рівня напруги, що наведена в прийомній котушці індуктивності та яка викликана наявністю магнітного поля, що створюється вихровими струмами, які протікають у металевих об'єктах [2; 3]. Оскільки рівень напруги, що наводиться у прийомній котушці, є дуже малим (від одиниць

мілівольт), його точне вимірювання і фіксація є складною задачею, тому з метою підсилення наведеної напруги використовується коливальний контур, у якому до прийомної котушки паралельно під'єднується конденсатор. Спрощену схему одноконтурного резонансного металошукача індукційного типу показано на рис. 1 [4].

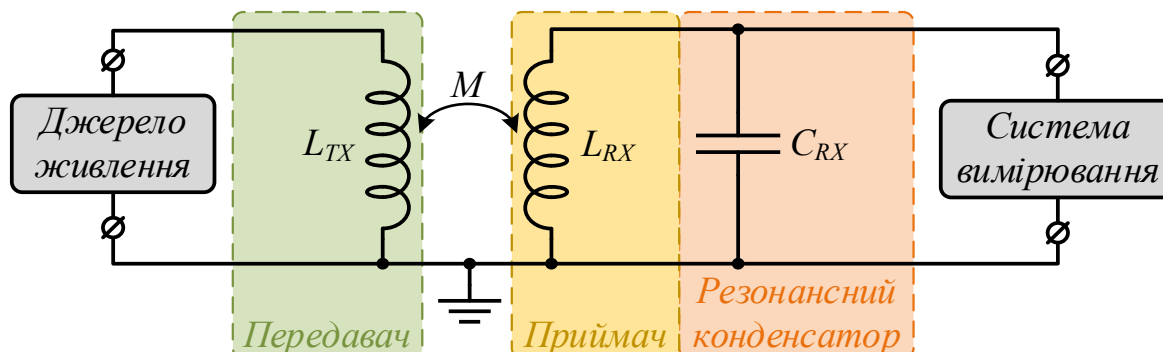


Рис. 1. Спрощена схема одноконтурного резонансного металошукача індукційного типу

Прийомну котушку (L_{RX}) паралельно з'єднано з конденсатором (C_{RX}), де при резонансі й буде відбуватися підсилення наведеної напруги.

Слід зауважити, що особливості побудови самого металошукача, а також його вимірювальних вузлів не є темою цієї статі.

Для опису й вимірювання параметрів процесів, які протікають у котушках, що генерують і сприймають магнітне поле (за відсутності інших феромагнітних середовищ чи матеріалів), використовується закон Біо-Савара-Лапласа, який дозволяє визначати індукцію магнітного поля \vec{dB} , яке створюється відрізком лінійного дроту \vec{dl} , по якому протікає деякий струм I у напрямку \vec{dl} у точці простору, віддаленій на відстань R від елемента струму за формулою [5; 6]:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{[\vec{dl} \cdot \vec{R}_0]}{R^2}, \tag{1}$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму, що становить $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Hn}{m}$;

\vec{R}_0 – одиничний вектор, проведений від \vec{dl} до точки простору, де і визначається магнітна індукція.

Результуюча магнітна індукція в точці простору визначається шляхом інтегрування по всій довжині (l) замкненого контуру за такою формулою [5; 6]:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \int_l \frac{[\vec{dl} \cdot \vec{R}_0]}{R^2}. \tag{2}$$

Таким чином, проблема розрахунку індукції магнітного поля, створеної котушкою в деякій довільній області (множині точок) простору, є досить складною і громіздкою для розв'язання математично. До того ж її складність прямо пропорційна кількості цих точок.

Слід також зазначити, що під дією магнітного поля в металевих об'єктах будуть наводитись вихрові струми (струми Фуко), розподіл яких визначити досить важко, але враховувати потрібно. Ці струми будуть створювати своє магнітне поле, яке буде також взаємодіяти із приймальною котушкою металошукача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання металошукачів індуктивного типу для вирішення проблеми пошуку вибухонебезпечних предметів (снарядів, мін та ін.) залишається однією з найпоширеніших практик як у військовій справі, так і при гуманітарному розмінуванні [1; 2; 4; 9]. Їх використання дозволяє отримати певні переваги: порівняно низьку собівартість, відносно швидке навчання персоналу для користування такими металошукачами, простота налаштування і обслуговування. Однак питання підвищення ефективності їх застосування, збільшення швидкості пошуку вибухових предметів залишаються предметом досліджень [3; 10–13].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Як зазначалося вище, якщо величина магнітної індукції відома, то далі можна розрахувати магнітний потік крізь площину приймальної котушки металошукача за формулою (тут інтеграл слід брати по всій площині приймальної котушки) [5; 6]:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (3)$$

Оскільки крізь котушку, що є джерелом магнітного поля, протікає змінний струм, то і магнітний потік крізь площину приймальної котушки також буде змінним. У свою чергу, ЕРС, яка буде наводитися у прийомній котушці, може бути визначена за правилом Ленца [5; 6]:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (4)$$

Одним із варіантів вирішення проблеми складних розрахунків індукції магнітного поля та ЕРС є проведення натурального експерименту, для виконання якого необхідно виготовляти або купувати самі котушки, створювати відповідні умови, а також використовувати спеціалізовані вимірювальні прилади, які (залежно від класу точності й діапазону вимірювань) можуть коштувати дуже дорого.

Зважаючи на зазначене вище, для вирішення проблеми розрахунку параметрів магнітного поля, створеного котушками складної геометричної форми в присутності металевих об'єктів, запропоновано застосувати комп'ютерне моделювання, яке буде здійснюватися в середовищі COMSOL Multiphysics.

Мета статті. Метою статті є розробка комп'ютерної моделі виявлення металевих предметів за допомогою найпоширенішого класу металошукачів індуктивного типу в середовищі COMSOL Multiphysics, налаштування її параметрів, а також аналіз результатів моделювання із визначення можливих напрямів застосування створеної моделі.

Створення комп'ютерної моделі і налаштування її параметрів. Процес створення комп'ютерної моделі в середовищі COMSOL Multiphysics починається з вибору розмірності простору (одно-, дво- або тривимірний), у якому буде відбуватися моделювання. Оскільки обидві котушки одноконтурного резонансного металошукача індукційного типу, а також сам пошуковий предмет є тривимірними об'єктами, і розташовуються у просторі довільним чином, вибираємо тривимірну модель (3D).

На наступному кроці вибираються вбудовані в COMSOL інтерфейси, призначені для цільового моделювання в конкретній галузі (акустика, хімія, електрохімія, радіочастотна передача тощо) [7; 8]. Оскільки будь-який металодетектор є електромагнітним пристроєм, робота якого базується на генерації електромагнітного поля та вимірюванні його параметрів, до моделі підключається інтерфейс Magnetic Fields. Також додається інтерфейс Electric Circuit для побудови електричного кола (для резонансного конденсатора, підключеного до прийомної котушки).

Далі необхідно обрати розв'язувач, який буде виконувати розрахунки і шукати значення всіх параметрів, передбачених підключеними інтерфейсами (параметри електромагнітного поля, напруги та струми в електричному колі). Оскільки система

котушок буде утворювати змінне електромагнітне поле (у металошукачах, зазвичай, використовується діапазон частот від 3 КГц до 27 КГц [11, 12]) необхідно застосувати розв'язувач для частотної області Frequency Domain. Крім цього, для аналізу просторових параметрів системи котушок, що не є ні лінійними, ні спіральними необхідно підключити розв'язувач Coil Geometry Analysis. Також для проведення параметричних розрахунків (один або більше параметрів є змінними) треба додати інструмент Parametric Sweep.

Створення моделі на цьому етапі є завершеним, але вона все ще є порожньою. Для дослідження необхідно виконати такі етапи: побудувати геометрію моделі; визначити матеріали для кожного об'єкта; вказати взаємозв'язки побудованих геометричних об'єктів із елементами розрахункових модулів, наприклад, котушок; побудувати розрахункову сітку.

Найбільш поширеним зараз є використання так званої DD або Double D системи котушок індуктивності (рис. 2) [3; 9; 10].



Рис. 2. Зовнішній вигляд системи пошукових котушок Double D індукційного металошукача

Як джерело генерації і пристрою вимірювання електромагнітного поля тут використовуються котушки індуктивності D-подібної форми із різною кількістю витків і товщиною дроту, які розташовуються таким чином, що мають певну область перекриття по горизонталі, і розміщуються на певній відстані одна від одної по вертикалі [9]. Особливістю функціонування такої системи котушок є наявність так званої напруги “небалансу”, яка утворюється за рахунок того, що кількість ліній магнітного поля, яка пронизує приймальну котушку в прямому і протилежному напрямках не є однаковою. Типове значення цієї напруги становить до одиниць мілівольт [10]. Слід зауважити, що ця напруга буде неперервно наводитися у прийомній котушці навіть за відсутності будь-якого металевих об'єкта. У ролі параметрів для моделювання було обрано параметри реально існуючої системи Double D котушок для металошукача Fischer F5 [14]. Для вимірювання величин індуктивності та активного опору приймальної і генеруючої котушок було використано багатофункціональний прилад GM328A [15]. Зокрема, з'ясовано, що робоча частота цього металошукача становить 7700 Гц.

Усі параметри моделі можуть бути задані у вигляді чисел безпосередньо у відповідних полях або у вигляді списку іменованих значень у вкладці Parameters розділу Global Definitions. Для зручності налаштування та редагування моделі слід використовувати саме другий варіант.

Вміст таблиці параметрів моделі показано на рис. 3. Варто зазначити, що COMSOL Multiphysics підтримує можливість як безпосередньо задавати значення параметрів моделі, так і розраховувати одні параметри на основі значень інших [7]. Для поставленої задачі визначено такий список параметрів:

1. Ext_Coil_R – зовнішній радіус котушок системи (однаковий для обох котушок).
2. Thickness – загальна товщина кожної котушки.

3. Coil_alpha – центральний кут, на який опирається радіус випуклої частини кожної котушки.
4. p1, p2, p3, p4 – точки, що належать кривим, які описують зовнішній вигляд кожної із котушок індуктивності системи.
5. Turns_N_1 – кількість витків передавальної котушки.
6. Wire_S_1 – площа поперечного перерізу дроту передавальної котушки.
7. Wire_D – діаметр дроту, із якого виготовлено передавальну котушку.
8. Turns_N_2 – кількість витків прийомної котушки.
9. Wire_S_2 – площа поперечного перерізу дроту прийомної котушки.
10. Freq – частота змінного струму, що пропускається крізь котушку, яка генерує магнітне поле системи.
11. Res_Cap – ємність резонансного конденсатора, що підключений до прийомної котушки металошукача.
12. Coil_L – індуктивність прийомної котушки системи.
13. Coin_X – x-координата розташування центру металевго об’єкта-мішені.
14. Coin_Y – y-координата розташування центру металевго об’єкта-мішені.
15. Coin_Z – z-координата розташування центру металевго об’єкта-мішені.
16. Coin_R – радіус металевго об’єкта-мішені.
17. Coin_H – товщина металевго об’єкта-мішені.

Name	Expression	Value
Ext_Coil_R	150[mm]	0.15 m
Thickness	10[mm]	0.01 m
Coil_alpha	192.4[deg]	3.358 rad
p1	Ext_Coil_R*cos((360[deg]-Coil_alpha)/2)	0.0162 m
p2	p1-Thickness	0.0061999 m
p3	Ext_Coil_R-Thickness	0.14 m
p4	acos(p2/p3)	1.5265 rad
Turns_N_1	156	156
Wire_S_1	0.037[mm^2]	3.7E-8 m ²
Wire_D	sqrt(4*Wire_S_1/pi)	2.1705E-4 m
Turns_N_2	35	35
Wire_S_2	0.175[mm^2]	1.75E-7 m ²
Freq	7.7[kHz]	7700 Hz
Res_Cap	1/((2*pi*Freq)^2*Coil_L)	3.7972E-8 F
Coil_L	11.251[mH]	0.011251 H
Coin_X	0[mm]	0 m
Coin_Y	0[mm]	0 m
Coin_Z	-10[mm]	-0.01 m
Coin_R	25[mm]	0.025 m
Coin_H	5[mm]	0.005 m

Рис. 3. Найменування (Name) і значення (Value) параметрів моделі, заданих користувачем

Джерело: розроблено авторами.

Геометрична побудова фізичних об’єктів моделі може бути виконана за допомогою вбудованих інструментів Comsol Multiphysics або із використанням будь-якої іншої системи автоматизованого проектування. Для поточної задачі буде достатньо вбудованих інструментів.

Дерево геометричної побудови 3D-моделі та її результат зображено на рис. 4:

1. Верхня котушка побудована шляхом витягування у просторі (ext1) пласкої проєкції (wp1).
2. Нижня котушка побудована шляхом копіювання зі зміщенням (copy1) та віддзеркаленням (mir1) верхньої.

3. Металевий об’єкт, що буде детектуватися є простим циліндром (cyl1).

4. Розрахункова область циліндричної форми (cyl2).

Область, яку буде визначено як ґрунт, не створювалась окремо, адже електрична провідність ґрунту є дуже малою величиною (0,01 См/м) у порівнянні із провідністю металевого об’єкта ($38 \cdot 10^6$ См/м для алюмінію), і нею можна знехтувати.

Електромагнітне поле поширюється в усіх напрямках і стане рівним 0 при безмежному віддаленні від системи котушок, але нам необхідно знати параметри поля безпосередньо у просторі під котушками, тобто розрахунок параметрів на відстані, яка перевищує 0,5 м від системи котушок вгору чи у будь-який бік, не має сенсу. Для цього навколо основної розрахункової області виділено окремий зовнішній шар. Він необхідний для можливості задання безмежно віддаленої границі.

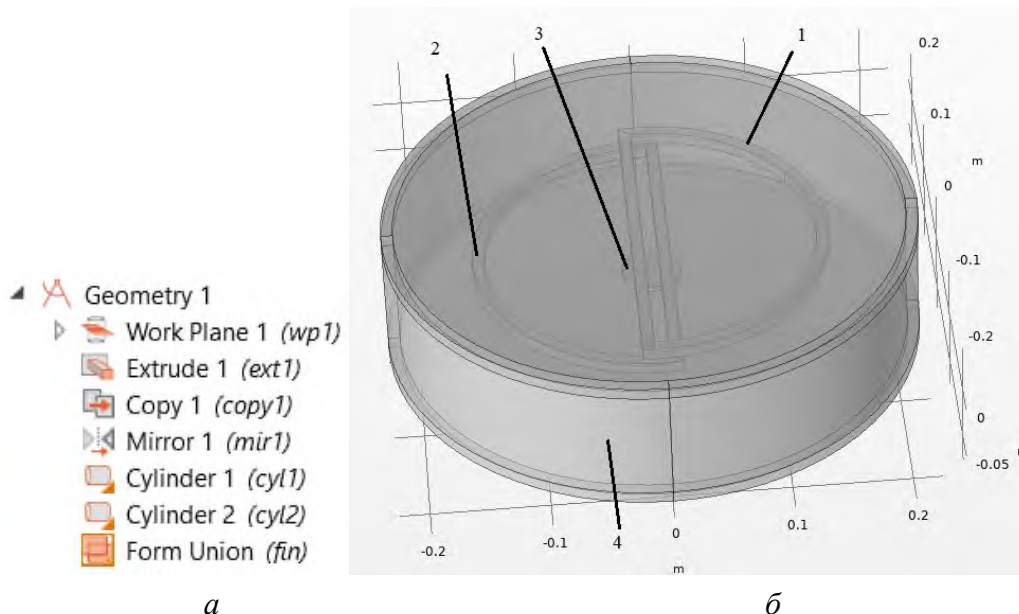


Рис. 4. Дерево геометричної побудови (а) та отримана тривимірна модель системи DD-котушок і металевого об’єкта-мішені (б)

Джерело: розроблено авторами.

Далі необхідно визначити матеріали кожного геометричного об’єкта, задати їхні властивості. У межах задачі необхідно вказати: відносну магнітну проникність μ_r ; відносну діелектричну проникність ϵ_r ; питому електричну провідність σ . Властивості матеріалів можна задавати як вручну, так і скористатися готовими бібліотеками. Для цієї моделі було використано матеріали із бібліотеки, наведеної в табл. 1.

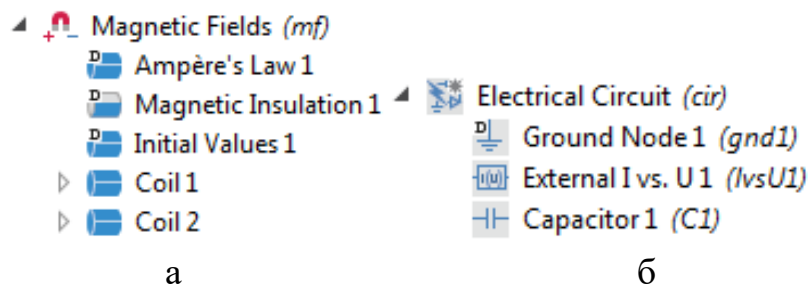
Таблиця 1 – Перелік об’єктів моделі із визначеними матеріалами та параметрами

Об’єкт моделі	Матеріал	Параметри		
		μ_r	ϵ_r	$\sigma, S/m$
Котушки	Мідь	1	1	$6 \cdot 10^7$
Металевий об’єкт	Алюміній	1	1	$3.8 \cdot 10^7$
Розрахункова область	Повітря	1	1	10^{-6}

Джерело: розроблено авторами.

Для повітря задано ненульову електричну провідність з метою покращення збіжності рішення задачі розв’язувачем та прискорення процесу розрахунку [7], оскільки різниця між провідностями повітря, котушок та металевого об’єкта (яка складає 13 порядків) на точність розрахунку суттєво не вплине.

Наступним кроком необхідно налаштувати підключені до моделі інтерфейси Magnetic Fields та Electric Circuit (рис. 5). Інструментом Coil інтерфейсу Magnetic Fields задаються об'єкти, що є котушками (рис. 5, а). Для кожної з них задаються такі налаштування: котушки є багатовитковими; кількість витків; площа поперечного перерізу дроту. Далі для передавальної котушки (верхньої, Coil 1) задається струм, що створюється в ній джерелом живлення (0.1 А). Для прийомної котушки (нижньої, Coil 2) вказується підключення до електричного кола. У системі Double D немає принципової різниці, яка із двох котушок (приймна чи випромінююча) буде розташована вище за іншу [13]. В інтерфейсі Electrical Circuit задається під'єднання прийомної котушки (External I vs. U1) до резонансного конденсатора (Capacitor 1) (рис. 5, б).



а

б

Рис. 5. Древа інтерфейсів моделі: Magnetic Fields (а) та Electric Circuit (б)
Джерело: розроблено авторами.

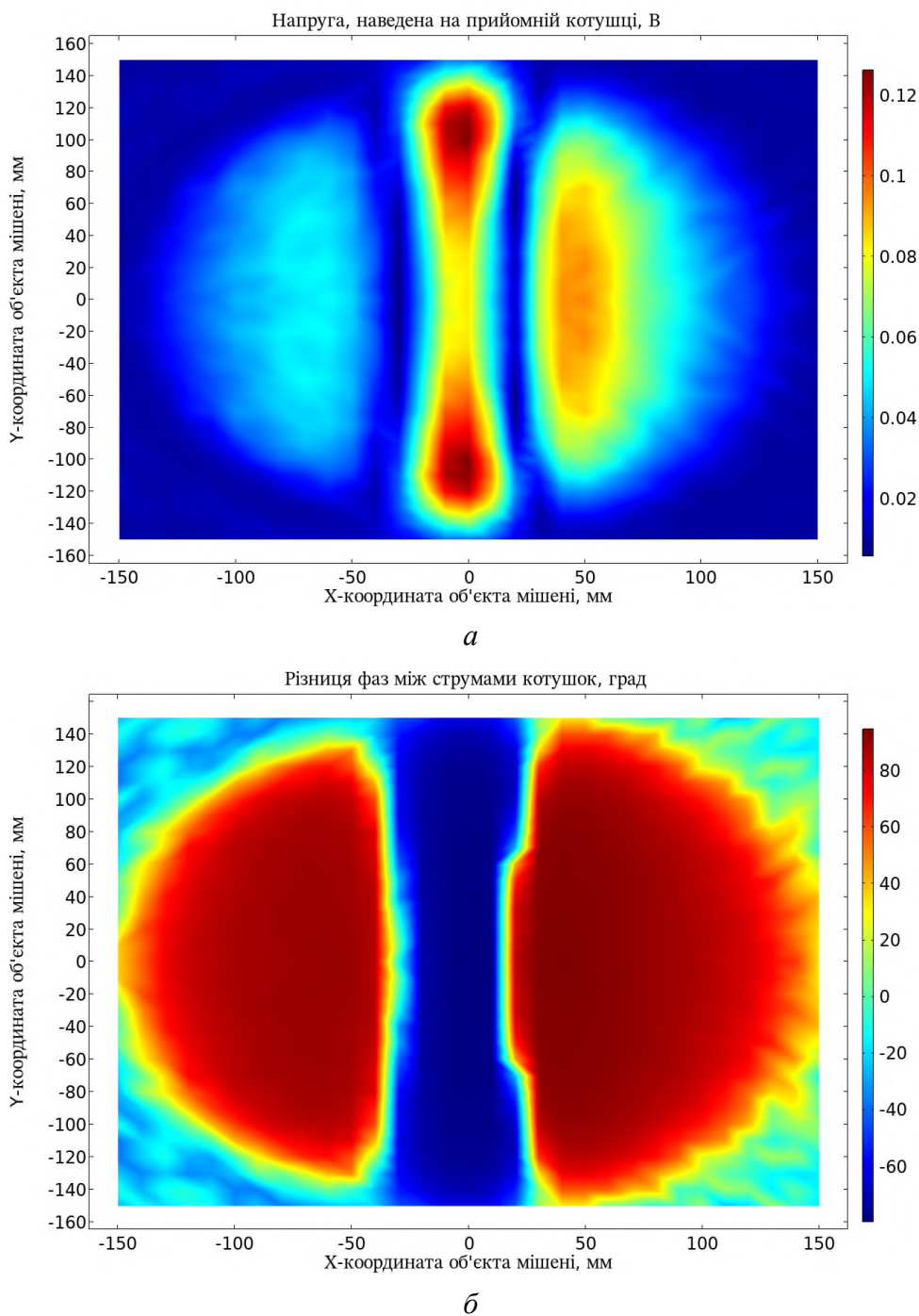
Останнім кроком є побудова сітки розрахунків (рис. 6). Цей етап є дуже важливим, адже від структури сітки залежить не лише точність розрахунку результатів, а також час моделювання і кількість задіяних апаратних ресурсів (оперативна пам'ять, завантаженість процесора та ін.).

Приклади застосування розробленої комп'ютерної моделі. Comsol Multiphysics дає можливість отримувати результати розрахунку в числовій та графічній формі. Для поставленої задачі, в якій необхідно досліджувати залежність напруги наведеної на прийомній котушці від багатьох параметрів металевих об'єктів, що знаходяться в електромагнітному полі системи котушок (форма, координата у просторі, розміри, матеріал) найбільш зручним є графічне представлення результатів у вигляді одновимірних графіків або двовимірних поверхонь (так званих кольорових карт).

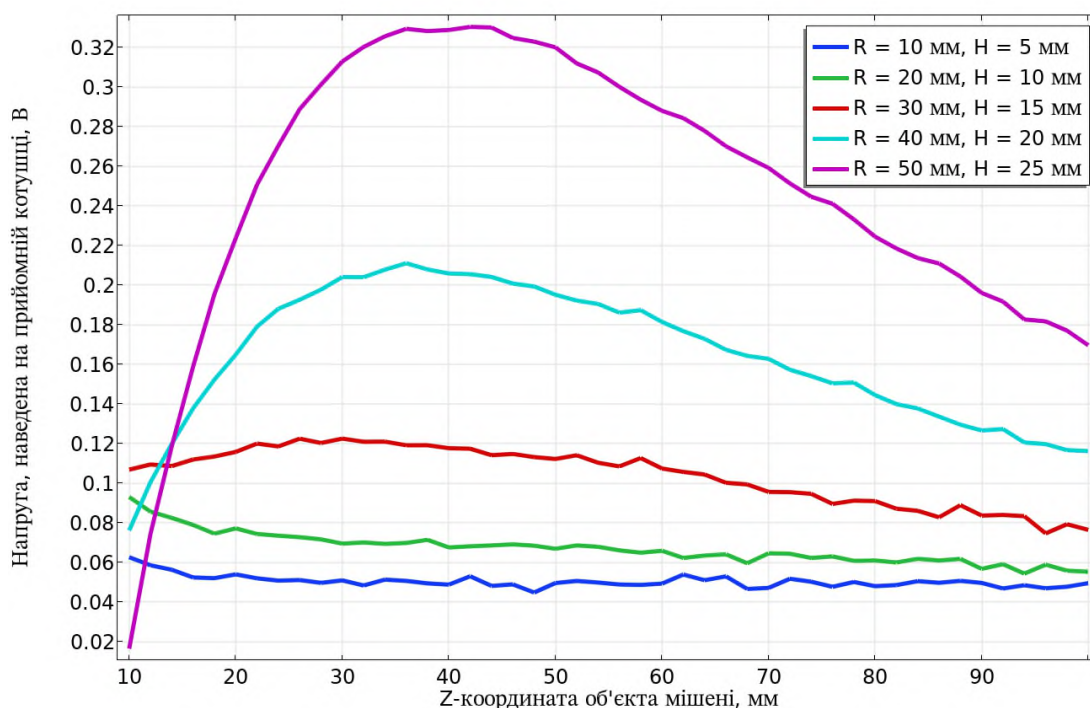
На рис. 6 зображено кольорові карти залежності напруги, що наводиться у прийомній котушці (рис. 6, а), а також різниці фаз струмів котушок (рис. 6, б) від горизонтального зміщення (в координатах X та Y) алюмінієвого об'єкта-мішені товщиною 5 мм і радіусом 25 мм відносно центру системи котушок в площині, паралельній до неї, при фіксованій вертикальній відстані (координата Z, -20 мм).

З рис. 6 видно, що зміна горизонтального розташування мішені суттєво впливає на напругу, що наводиться у прийомній котушці, причому спостерігаються локальні мінімуми в зонах, що знаходяться безпосередньо під витками котушок. Тобто наявність мішені буде виявлятися саме в процесі переміщення системи котушок над нерухомою мішенню. Напруга має величину, достатню для стійкого детектування (понад 100 мВ). Додаткове вимірювання зсуву фаз дозволить відрізнити положення мішені під зоною перетину котушок від зони, що знаходиться лише під однією з котушок.

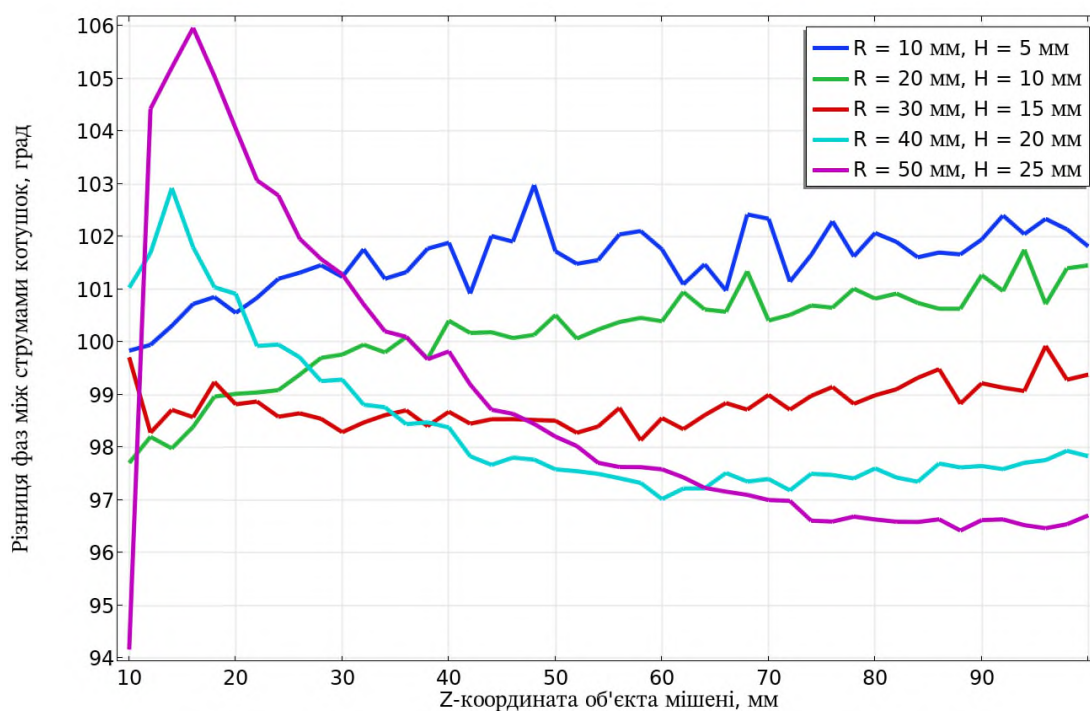
На рис. 7 зображено сімейства графіків залежності напруги, що наводиться у прийомній котушці (рис. 7, а), а також різниці фаз струмів котушок (рис. 7, б) від зміщення алюмінієвого об'єкта-мішені вздовж вертикальної осі (координата Z) за фіксованого горизонтального положення (координати X та Y) по центру системи котушок та різних розмірах об'єкта-мішені (радіуса R та товщини H).



*Рис. 6. Залежність напруги, що наводиться у прийомній котушці:
 а – та різниці фаз між струмами котушок;
 б – від положення металевого об'єкта-мішені в горизонтальній площині*
 Джерело: розроблено авторами.



a



б

Рис. 7. Залежність напруги, що наводиться у прийомній котушці:
 а – та різниці фаз між струмами котушок б – від положення металевого
 об'єкта-мішені на вертикальній осі при зміні його розмірів

Джерело: розроблено авторами.

Зі збільшенням розміру мішені відносно розмірів котушок системи напруга, що наводиться на прийомній котушці, загалом зростає, тобто об'єкти великого розміру будуть детектуватися набагато легше. Найменшу чутливість детектора при радіусі мішені

у 10 мм можна пояснити тим, що такий об'єкт найменшим чином впливає на нерівномірність магнітних потоків через різні частини площини, обмеженої приймальною котушкою. Графіки, подібні наведеним, дозволяють визначити глибину гарантованого детектування металевго об'єкта-мішені певної форми та розмірів.

Проаналізувавши рисунок також можна побачити, що для більших розмірів об'єкта-мішені максимальна напруга наводиться на прийомній котушці не на мінімальній відстані від системи котушок. Різниця фаз струмів при цьому змінюється не суттєво. Ламана форма графіка зумовлена перебудуванням сітки на кожній ітерації розрахунку (при зміні координати об'єкта-мішені), що призводить до несуттєвих змін результатів моделювання.

На рис. 8 зображено графіки залежності величини напруги (крива синього кольору), що наводиться у прийомній котушці, а також різниці фаз (крива зеленого кольору) струмів котушок від величини питомої електричної провідності об'єкта-мішені (діаметром 50 мм, товщиною 5 мм, що лежить на глибині 20 мм). Можна побачити, що наведена напруга в цьому випадку змінюється дуже слабо (менше ніж на 20 мВ), але помітно змінюється різниця фаз між струмами котушок, що може бути використано для детектування матеріалу, з якого виготовлено металевий об'єкт.

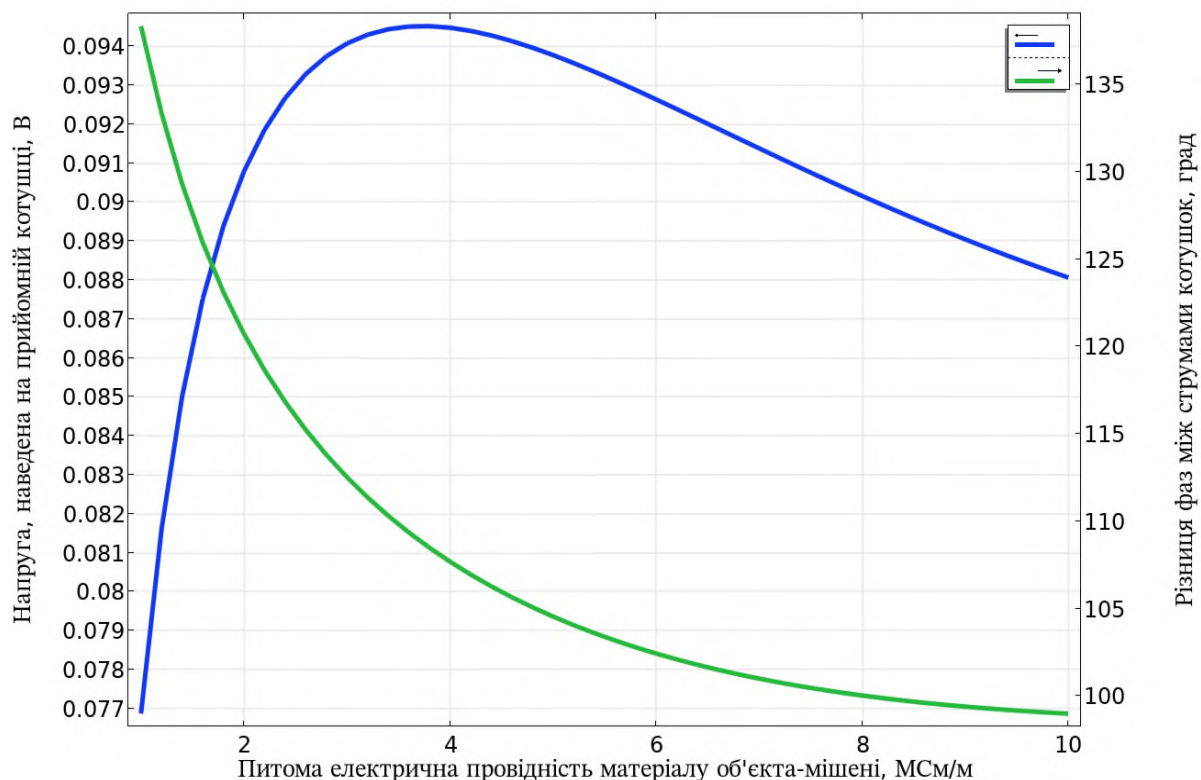


Рис. 8. Залежність напруги, що наводиться у прийомній котушці та різниці фаз між струмами котушок від питомої електричної провідності об'єкта-мішені
Джерело: розроблено авторами.

Висновки. У статті було побудовано й досліджено комп'ютерну модель процесу виявлення металевих об'єктів за допомогою одноконтурного резонансного металошукача індукційного типу в середовищі моделювання COMSOL Multiphysics. Запропонована модель дозволяє отримувати графічні залежності між різними параметрами та розраховувати їх значення. Як параметри в процесі моделювання було використано параметри реально існуючого металошукача Fisher F5, а також системи котушок індуктивності типу Double D до нього.

Як видно із результатів, наведених на рис. 6–8, величина напруги на прийомній котушці індуктивності системи знаходиться в діапазоні від одиниць до сотень мілівольт, відповідно, такої напруги буде достатньо для фіксації сучасними засобами вимірювання, що входять до складу металошукача.

Запропоновану й описану комп'ютерну модель можна використовувати для проведення віртуальних експериментів, що дозволяє:

- скоротити час вибору металошукача, в залежності від особливостей задачі, що вирішується, а також заощадити гроші на його купівлю;
- відшукувати форму котушок індуктивності, що найбільш оптимально підходить під конкретну задачу, оскільки, процес виготовлення котушок є дорогим та трудомістким, що істотно ускладнює проведення натурних експериментів;
- визначати, на якій відстані та глибині може знаходитися металевий об'єкт заданої форми, щоб його можна було гарантовано детектувати вибраною системою;
- визначати межі гарантованого детектування об'єкта залежно від металу, з якого він виготовлений, а також його геометричної форми та розмірів;
- визначати вплив середовища, у якому знаходиться металевий об'єкт, на межі області його детектування (за умови, якщо відповідне середовище буде додано до створеної тривимірної моделі);
- визначати межі гарантованого детектування металевих об'єктів залежно від частоти змінного струму, що пропускається крізь генеруючу котушку.

Список використаних джерел

1. Сигута, А. Дослідження методів пошуку вибухонебезпечних предметів / А. Сигута, О. Красножон // Технічні науки і технології. – 2024. – № 1(35). – С. 156-169.
2. Qun Guo. A Multiarray Electromagnetic Instrument for Shallow Surface Real-Time Detection / Qun Guo, Sirui Zhou, Xinhao Zhang, Caitang Sun, Gang Li // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Vol. 70. – Pp. 1-9.
3. Ambruš, D. A Portable Planar Coil Array for Frequency-Domain Inductive Sensing of Metallic Objects / D. Ambruš, D. Vasić, V. Bilas // 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – Dubrovnik, Croatia, 2020. – Pp. 1-5. DOI: 10.1109/I2MTC43012.2020.9128673
4. Цимбал, О. В. Дискримінація металів у металошукачах / О. В. Цимбал // Електронна та Акустична Інженерія. – 2019. – № 2(4). – С. 22–27. 2(4). DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-0965.2019.2.4.163837>
5. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники : учеб. для электротех. и энерг. вузов : у 3-х ч. Ч. 3 : Теория электромагнитного поля / Л. Р. Нейман, П. Л. Калантаров. – Изд. 5-е, перераб. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1959. – 232 с.
6. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле : учебник для вузов / Л. А. Бессонов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1978. – 231 с.
7. Introduction to COMSOL Multiphysics. – Accessed mode: <https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>.
8. Dymerecs, A. V. Simulation of a Grid Multi-Layer Shield to Reduce the Magnetic Field of Power Lines / A. V. Dymerecs, A. V. Krasnozhon, O. V. Krasnozhon // Microsystems, Electronics and Acoustics. – 2020. – Vol. 25, №3. – Pp. 5-10.
9. Guelle, D. Metal detector handbook for humanitarian demining / D. Guelle, A. Smith, A. Lewis, T. Bloodworth. – Norwich: Office for Official Publications of the European Communities, 2003. – 180 p.
10. Ambrus, D. Comparative Study of Planar Coil EMI Sensors for Inversion-Based Detection of Buried Objects [Electronic resource] / Davorin Ambrus, Darko Vasic, Vedran Bilas // IEEE Sensors Journal. – 2020. – Vol. 20, no. 2. – Pp. 968-979. – Accessed mode: <https://doi.org/10.1109/jsen.2019.2944752>.
11. Scott, W. R. Array of broadband electromagnetic induction sensors for detecting buried objects / W. R. Scott // Proc. SPIE 10182, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXII, 1018214 (3 May 2017). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2262944>.

12.Scott, W. R. Broadband Array of Electromagnetic Induction Sensors for Detecting Buried Landmines / W. R. Scott // *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. – Boston, MA, 2008. – Pp. II-375-II-378.

13.Ambruš, D. Active induction balance method for metal detector sensing head utilizing transmitter-bucking and dual current source / D. Ambruš, D. Vasić, V. Bilas // *Journal of Physics Conference Series*. – 2013. – 450(1):2047. – Pp. 1-6. DOI:10.1088/1742-6596/450/1/012047.

14.Руководство пользователя Fisher F5 / Офіційні металошукачі України. – Режим доступу: <https://klad.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/f5.pdf>.

15.K“ubbeler, Karl-Heinz, Tester ERE s AVR mikrokontrollerom i minimumom dopolnitelnykh elementov / Karl-Heinz K“ubbeler. – Accessed mode: <https://www.nikom.biz/pdf/A438001.pdf>.

References

1. Syguta, A., Krasnozhon, O. (2024). Doslidzhennia metodiv poshuku vybukhonebezpechnykh predmetiv [Research of methods of searching for explosive objects]. *Tekhnichni nauky i tekhnolohii: naukovyi zhurnal – Technical sciences and technologies*, 1(35), 156-169.

2. Guo, Q., Zhou, S., Zhang, X., Sun, C., Li, G. (2021). A Multiarray Electromagnetic Instrument for Shallow Surface Real-Time Detection. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-9.

3. Ambruš, D., Vasić, D. and Bilas, V. A. (2020). Portable Planar Coil Array for Frequency-Domain Inductive Sensing of Metallic Objects. *2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. Dubrovnik, Croatia. (pp. 1-5). doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9128673.

4. Tsumbal, O.V. Metal Discrimination in Metal Detector. *Electronic and Acoustic Engineering*, 2(4), 22–27. <https://doi.org/10.20535/2617-0965.2019.2.4.163837>.

5. Neyman, L.R., Kalantarov, P.L. (1959). Theoretical foundations of electrical engineering. Part 3. Theory of the electromagnetic field. (5-th ed.). Moscow-Leningrad: Gosehnergoizdat.

6. Bessonov, L.A. (1978). Theoretical foundations of electrical engineering: Electromagnetic field. Textbook for university students. (7th ed.). Vyissha shkola.

7. Introduction to COMSOL Multiphysics. (n.d.). cdn.comsol.com. Retrived from <https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>.

8. Dymereets, A.V., Krasnozhon, A.V., Krasnozhon, O.V. (2020). Simulation of a Grid Multi-Layer Shield to Reduce the Magnetic Field of Power Lines. *Microsystems, Electronics and Acoustics*, 25(3), 5-10.

9. Guelle, D., Smith, A., Lewis, A., Bloodworth, T. (2003). Metal detector handbook for humanitarian demining. Norwich: Office for Official Publications of the European Communities.

10.Ambruš, D., Vasić, D., Bilas, V. (2019). Comparative Study of Planar Coil EMI Sensors for Inversion-Based Detection of Buried Objects. *IEEE Sensors J.*, 1-12.

11.Scott, W. R. (2017). Array of broadband electromagnetic induction sensors for detecting buried objects. Proceedings of SPIE 10182, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XXII, 1018214 (3 May 2017). <https://doi.org/10.1117/12.2262944>.

12.Scott, W. R. (2008). Broadband Array of Electromagnetic Induction Sensors for Detecting Buried Landmines, *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. (pp. II-375-II-378). Boston, MA.

13.Ambruš, D., Vasić, D., Bilas, V. (2013). Active induction balance method for metal detector sensing head utilizing transmitter-bucking and dual current source. *J. Phys.: Conf. Ser.* 450 012047, 1-6.

14.Posibnyk korystuvacha [User’s manual]. (2020). klad.com.ua. <https://klad.com.ua/wp-content/uploads/2020/02/f5.pdf>.

15.Bazykin, S. (2017). Tester ERE s AVR mikrokontrollerom i minimumom dopolnitelnykh elementov. [DER tester with AVR microcontroller and minimum additional elements]. <https://www.nikom.biz/pdf/A438001.pdf>.

Отримано 02.12.24

Krasnozhon Oleksii¹, Krasnozhon Andrii², Dymerecs Andrii³, Syguta Artem⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: wingcommander2011@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2500-254X>

Scopus Author ID: 57190377188

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of electrical engineering and information
and measurement technologies

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: red_john@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6215-7535> **Scopus Author ID:** 57191825825

³PhD student of the Department of Electronics, Automatics, Robotics, Mechatronics, group ASD-122-22
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: andrey.dymerecs@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7617-5291> **Scopus Author ID:** 57204287360

⁴PhD student of the Department of Information and Computer Systems, group ASD-122-22
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: syguta@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-8328-1277>

**COMPUTER MODEL FOR DETECTING THE METAL OBJECTS
WITH INDUCTION METAL DETECTOR**

The relevance of the article is to highlight the process of creating a computer model of metal object detection in the COMSOL Multiphysics environment and the results of its application. Its use will increase the efficiency of the use of induction metal detectors, which is extremely important under war conditions, as it will allow better and faster detection of metal explosive objects.

One of the most common in terms of price/quality ratio for detecting metal objects is the single-circuit resonant inductive metal detector, which has certain structural features. The ability to detect metal objects is provided by a system of induction coils, the most common of which is the Double D type system. The problem of calculating the induction of the magnetic field generated by a coil in any region (set of points) of space is therefore very complex and difficult to solve mathematically. Moreover, its complexity is directly proportional to the number of these points.

The purpose of the article is to develop a computer model for the detection of metal objects for an inductive metal detector with a double D-coil system, to configure its parameters using the example of a real Fischer F5 metal detector; to analyse the results of the application with the determination of the possible directions of use of the created model, as well as the features and limitations of its application.

The article presents the results of creating a three-dimensional model of the metal object detection system, describes its main parameters, and lists the interfaces and tools used in the COMSOL environment. Graphs and colour maps show the dependence of the voltage induced in the receiver coil and the phase difference between the currents of the two coils on the position of a cylindrical metal target as it moves in the horizontal and vertical planes, as its geometric dimensions change and as its specific electrical conductivity changes (corresponding to the change in metal). The limits of the geometric dimensions and the distance of the target from the system where detection becomes unlikely are determined.

The conclusions emphasise the significance of the results obtained, as well as possible directions for the application of the developed model and the benefits of its use.

Key words: computer model; metal detector; inductance; coil system; COMSOL Multiphysics; magnetic field; double D; object radius.

Fig.: 8. References: 15.

**Віталій Леонідович Левківський¹, Галина Вікторівна Марчук²,
Олександр Сергійович Москалик³**

¹доктор філософії з інженерії програмного забезпечення, доцент кафедри комп'ютерних наук

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: levkivskyu@ztu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1643-0895>. **ResearcherID:** GYU-9377-2022

²старший викладач кафедри комп'ютерних наук

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: pzs_mgv@ztu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2954-1057>. **ResearcherID:** AAD-7514-2022

³магістрант кафедри комп'ютерних наук

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: alexundercover191@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-6555-1545>

МОДЕЛЬ ІГРОВОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ НЕКЕРОВАНОВОГО ГРАВЦЕМ ПЕРСОНАЖУ

Штучний інтелект у відеоіграх відіграє ключову роль у формуванні ігрового процесу, а його створення завжди було комплексним та складним завданням. Навчання некерованих персонажів є ключовим завданням для отримання захопливих та реалістичних ігрових середовищ. Основною метою навчання NPC було забезпечення здатності до ефективного переслідування рухомої цілі. Результати експерименту підтвердили, що розроблена модель успішно навчається та приймає оптимальні рішення в умовах ігрового середовища. Дослідження довело ефективність використання методів машинного навчання у створенні ігрового штучного інтелекту. Перспективними напрямками подальших досліджень є інтеграція методів машинного навчання для надання неігровим персонажам додаткових здібностей, які сприятимуть більш глибокому зануренню гравців у ігровий процес.

Ключові слова: штучний інтелект; гра; некерований гравцем персонаж; машинне навчання; модель; навчання з підкріпленням; NPC.

Рис.: 9. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Завдяки досягненням у сфері машинного навчання, розробники відеоігор отримали потужні інструменти для створення більш інтерактивних та реалістичних ігрових світів. Від розробки алгоритмів для штучного інтелекту некерованих гравцем персонажів (Non Playable Characters – NPC) до застосування технологій масштабування зображень та аналізу поведінки гравців – машинне навчання знайшло широке застосування у сучасних іграх, суттєво спростивши та прискоривши процес розробки. На сьогодні машинне навчання - це революційна технологія, яка швидко розвивається та охоплює всі сфери розробки додатків. Ігровий штучний інтелект створений за допомогою методів машинного навчання дозволяє створити різноманітні та цікаві взаємодії гравця із NPC.

Постановка проблеми. Відеоігри зазнають стрімкої еволюції, а штучний інтелект стає рушійною силою цього прогресу. Завдяки машинному навчанню розробники отримують доступ до нових інструментів, що дозволяють творити захопливі та динамічні ігрові світи. Штучний інтелект дає можливість розширювати межі ігрового дизайну, створюючи NPC з глибоким характером, реалістичною поведінкою та непередбачуваними реакціями. Це робить взаємодію з ними більш природною та захопливою, а ігровий процес – більш динамічним. Однак основною проблемою на сьогодні є обмежений досвід використання навчання з підкріпленням для створення інтелектуальних неігрових об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині методи машинного навчання застосовуються в багатьох процесах розробки відеоігор. Автор статті [1] описує, як можна використати методи машинного навчання для генерації рівнів, керування NPC, зокрема, для генерації потрібних анімацій персонажів і розстановки світла на локації, що значно спрощує роботу розробникам та підвищує якість гри. Одним із перспективних

© В. Л. Левківський, Г. В. Марчук, О. С. Москалик, 2024

напрямів використання методів машинного навчання у сфері відеоігор є розробка моделі штучного інтелекту для некерованих гравцем персонажів. У статті [2] автор розглядає методи машинного навчання і підходи до створення штучного інтелекту у грі. Також він проводить експеримент зі створення моделі машинного навчання для керування NPC у грі про виживання, а в кінці наводить оцінку ефективності створеної моделі та порівнює її з традиційним способом створення штучного інтелекту у грі. Експеримент показав, що створена модель за допомогою методів машинного навчання має підвищену ефективність у порівнянні з класичною моделлю. Автори робіт [3; 4] демонструють успішну інтеграцію методів машинного навчання у відеоігри. Було розглянуто методи та способи їх застосувань, визначення нейронної мережі і те, як вона працює та вирішує проблему отримання та використання наборів даних для навчання моделі. У роботах описано повний цикл розробки - від планування можливостей моделі до її інтеграції у гру та збір даних про ефективність моделей.

У статті [5] проведено дослідження різних алгоритмів машинного навчання, включаючи традиційні методи, для створення інтелектуальних агентів для гри в шахи. За результатами аналізу було встановлено, що найкраще для цього підходить метод глибинного навчання. У роботі використано штучний інтелект AlphaZero.

Стаття [6] присвячена дослідженню методів машинного навчання з вчителем. Автор статті детально описує процес машинного навчання, приділяючи основну увагу навчанням із вчителем та розглядаючи такі алгоритми підходу, як дерево рішень, лінійну регресію, наївний Баєс та логістичну регресію. У статті [7] описано підхід самонавчання (англ. Self-play) який також можна застосувати у відеоіграх. Цей метод дозволяє пришвидшити та оптимізувати навчання моделі, оскільки вона тренується сама із собою.

Мета статті. Метою роботи є дослідження можливості застосування методу навчання з підкріпленням для створення моделі ігрового штучного інтелекту некерованого гравцем персонажу, який може самонавчатись та переслідувати ігрових персонажів.

Виклад основного матеріалу. Перші алгоритми та моделі нейронних мереж з'явилися у 1950-х роках. Артур Семюел створив програму на основі алгоритмів, які здатні самонавчатись. Семюел дав визначення терміну «машинне навчання». Згідно з цим визначенням, машинне навчання це «область досліджень розробки машин, які не є заздалегідь запрограмованими» [8]. Машинне навчання є розділом штучного інтелекту, його мета – передбачити результат та ухвалювати рішення на основі вхідних даних. Навчання з підкріпленням почало активно розвиватись протягом останніх років. У моделях машинного навчання існує два типи параметрів – параметрами моделі та гіперпараметри. Параметри моделі можуть бути ініціалізовані та оновлені в процесі навчання. Гіперпараметри (рис. 1) повинні бути ініціалізовані перед навчанням моделі, оскільки вони визначають архітектуру моделі машинного навчання [9].

У процесі розробки ігор активно використовується машинне навчання для автоматизації рутинних завдань, наприклад для створення локацій, генерації текстур, моделей тощо. Особливої популярності набуває ігровий штучний інтелект для некерованих гравцем персонажів. Машинне навчання стає дедалі потужнішим інструментом для розробників ігор, що прагнуть створити більш реалістичних та захопливих неігрових персонажів. Замість того, щоб вручну кодувати кожен аспект поведінки NPC, машинне навчання дозволяє їм «вчитися» у потрібному середовищі, що робить їх більш гнучкими та адаптивними до ігрового середовища.


```
behaviors:  
  Basic:  
    trainer_type: ppo  
    hyperparameters:  
      batch_size: 32  
      buffer_size: 256  
      learning_rate: 0.0003  
      beta: 0.005  
      epsilon: 0.2  
      lambda: 0.95  
      num_epoch: 3  
      learning_rate_schedule: linear  
    network_settings:  
      normalize: false  
      hidden_units: 20  
      num_layers: 1  
      vis_encode_type: simple  
    reward_signals:  
      extrinsic:  
        gamma: 0.9  
        strength: 1.0  
    keep_checkpoints: 5  
    max_steps: 500000  
    time_horizon: 3  
    summary_freq: 2000
```

Рис. 1. Гіперпараметри інструментарію ML-Agents

Джерело: розроблено авторами.

NVIDIA ACE For Games – це спеціальний сервіс для створення моделей штучного інтелекту, який має на меті перетворити ігри, наділивши неігрових персонажів інтелектом за допомогою взаємодії з природною мовою на основі штучного інтелекту [10]. Іншим прикладом використання машинного навчання є DLSS (deep learning super sampling) є технологія покращення зображення, розроблена NVIDIA для комп'ютерних ігор. За допомогою алгоритмів глибокого навчання DLSS може масштабувати зображення, збільшуючи роздільну здатність і збільшуючи частоту кадрів та зменшуючи навантаження на відеокарту.

Створення штучного інтелекту для некерованого гравцем персонажу.

Для навчання моделі машинного навчання та впровадження її у гру можна використовувати рушій Unity, який має модуль ML-Agents. За допомогою його можна проводити навчання моделі методом навчання з підкріпленням на основі PyTorch. Unity Machine Learning Agents Toolkit – це проект із відкритим вихідним кодом, який дозволяє використовувати ігри та симуляції як середовище для навчання інтелектуальних агентів [11].

Навчання моделі починають з простого завдання і поступово його ускладнюють. Воно складається з епізодів, де агент робить кроки з метою отримати нагороду. Спочатку агент діє випадково, досліджуючи навколишнє середовище та формуючи початкові зв'язки. Його мета – навчитися виконувати завдання, яке полягає у досягненні динамічної цілі. Для цього він буде використовувати підкріплення, отримуючи нагороди за кожен успішний крок. Як показано на рисунках 2 і 3, агент, що має набір скриптів, більшість з яких надаються інструментарієм ML-Agents, може навчатися на основі досвіду.

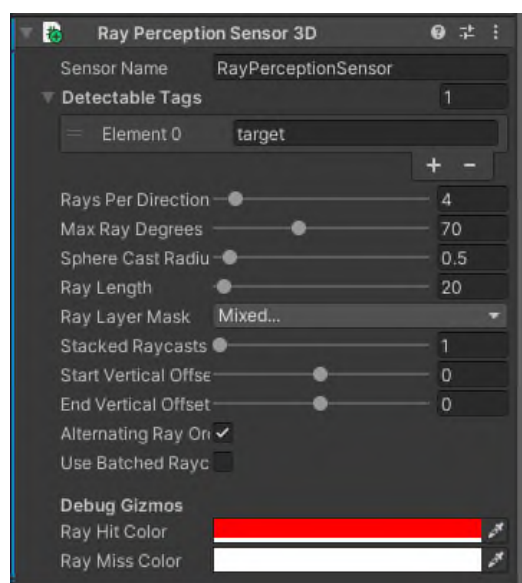
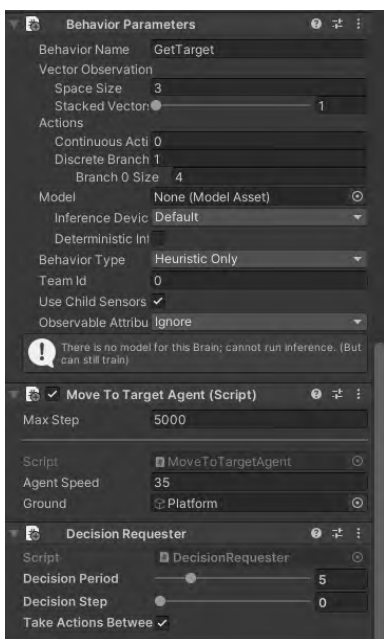


Рис. 2. Компоненти додані до агента
Джерело: розроблено авторами.

Рис. 3. Сенсор для розпізнавання об'єктів
Джерело: розроблено авторами.

Одним із головних компонентів є Behavior Parameters (рис. 2), де можна налаштувати назву поведінки, кількість значень для спостереження, тип поведінки (проекування нейронного мозку, або ручне управління) та тип (цілі числа, або числа з плаваючою комою) і кількість дій агента. Компонент, який зображений на рисунку 3 (Ray Perception Sensor 3D) потрібен для того, аби агент «спостерігав» і з часом асоціював об'єкти.

Наступним кроком потрібно дати можливість агенту пересуватись та отримувати нагороду або штрафи за поведінку. Для цього було створено скрипт MoveToTargetAgent (рис. 4).

```

public override void CollectObservations(VectorSensor sensor)
{
    sensor.AddObservation(transform.localPosition);
}

16 references
public override void OnActionReceived(ActionBuffers actions)
{
    var dirToGo = Vector3.zero;
    var rotateDir = Vector3.zero;

    var action = actions.DiscreteActions[0];

    switch (action)
    {
        case 1:
            dirToGo = transform.forward * 1f;
            break;
        case 2:
            dirToGo = transform.forward * -1f;
            break;
        case 3:
            rotateDir = transform.up * 1f;
            break;
        case 4:
            rotateDir = transform.up * -1f;
            break;
        case 5:
            dirToGo = transform.right * -0.75f;
            break;
        case 6:
            dirToGo = transform.right * 0.75f;
            break;
    }

    transform.Rotate(rotateDir, Time.fixedDeltaTime * 200f);
    m_AgentRb.AddForce(dirToGo * agentSpeed * Time.deltaTime,
        ForceMode.VelocityChange);
    AddReward(-1f / MaxStep);
}
    
```

Рис. 4. Скрипт MoveToTargetAgent

Джерело: розроблено авторами.

Навчання ML-Agents – це ітеративний процес, на початку якого він випадковим чином отримує дані про свою позицію і починає рух. Залежно від того, чи досягнуто ціль він отримує нагороду або штраф. Після виконання дії процес знову повторюється. Також для того щоб модель була здатна адаптуватись, потрібно кожного епізоду випадковим чином розставляти ціль, перепони та самого агента (рис. 5).

```
1 reference
private Vector3 GetRandomPosition()
{
    return new Vector3(Random.Range(-8, 8), 0f, Random.Range(-8, 0));
}

@ Unity Message | 0 references
public void OnTriggerEnter(Collider other)
{
    if (other.CompareTag("target"))
    {
        SetReward(5f);
        EndEpisode();
    }
}

@ Unity Message | 0 references
private void Update()
{
    if (transform.position.y < -1)
    {
        SetReward(-1f);
        EndEpisode();
    }
}
```

Рис. 5. Отримання нагороди

Джерело: розроблено авторами.

```
behaviors:
  GetTarget:
    trainer_type: ppo
    hyperparameters:
      batch_size: 1024
      buffer_size: 10240
      learning_rate: 0.0003
      beta: 0.005
      epsilon: 0.2
      lambda: 0.95
      num_epoch: 3
      learning_rate_schedule: linear
    network_settings:
      normalize: false
      hidden_units: 256
      num_layers: 1
      vis_encode_type: simple
    reward_signals:
      extrinsic:
        gamma: 0.99
        strength: 1.0
    keep_checkpoints: 5
    max_steps: 2000000
    time_horizon: 64
    summary_freq: 10000
```

Рис. 6. Налаштований конфігураційний файл гіперпараметрів

Джерело: розроблено авторами.

На початку тренування агент діє випадково, поступово він набуває досвіду. На рис. 7 можна спостерігати, що на перших ітераціях він має від'ємну нагороду (Mean reward), а далі вона стає позитивною.

```

C:\Windows\System32\cmd.exe
[INFO] GetTarget. Step: 120000. Time Elapsed: 131.574 s. Mean Reward: -0.668. Std of Reward: 1.676. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 130000. Time Elapsed: 141.598 s. Mean Reward: -1.305. Std of Reward: 0.272. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 140000. Time Elapsed: 151.797 s. Mean Reward: -1.176. Std of Reward: 0.316. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 150000. Time Elapsed: 161.726 s. Mean Reward: -0.549. Std of Reward: 1.763. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 160000. Time Elapsed: 171.658 s. Mean Reward: -1.208. Std of Reward: 0.287. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 170000. Time Elapsed: 181.596 s. Mean Reward: -0.076. Std of Reward: 2.103. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 180000. Time Elapsed: 191.351 s. Mean Reward: -0.365. Std of Reward: 1.949. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 190000. Time Elapsed: 201.478 s. Mean Reward: -0.237. Std of Reward: 2.013. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 200000. Time Elapsed: 211.588 s. Mean Reward: -0.187. Std of Reward: 2.249. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 210000. Time Elapsed: 221.388 s. Mean Reward: -0.377. Std of Reward: 1.973. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 220000. Time Elapsed: 231.463 s. Mean Reward: -0.045. Std of Reward: 2.033. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 230000. Time Elapsed: 241.558 s. Mean Reward: 0.811. Std of Reward: 2.562. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 240000. Time Elapsed: 251.418 s. Mean Reward: 0.613. Std of Reward: 2.684. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 250000. Time Elapsed: 261.660 s. Mean Reward: 0.516. Std of Reward: 2.524. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 260000. Time Elapsed: 271.695 s. Mean Reward: 2.403. Std of Reward: 2.810. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 270000. Time Elapsed: 281.785 s. Mean Reward: 2.011. Std of Reward: 2.934. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 280000. Time Elapsed: 291.733 s. Mean Reward: 2.066. Std of Reward: 2.989. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 290000. Time Elapsed: 301.669 s. Mean Reward: 2.690. Std of Reward: 2.820. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 300000. Time Elapsed: 311.684 s. Mean Reward: 3.721. Std of Reward: 2.261. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 310000. Time Elapsed: 321.876 s. Mean Reward: 2.742. Std of Reward: 2.864. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 320000. Time Elapsed: 331.977 s. Mean Reward: 3.076. Std of Reward: 2.752. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 330000. Time Elapsed: 342.215 s. Mean Reward: 3.719. Std of Reward: 2.392. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 340000. Time Elapsed: 352.581 s. Mean Reward: 4.166. Std of Reward: 1.961. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 350000. Time Elapsed: 362.716 s. Mean Reward: 4.364. Std of Reward: 1.718. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 360000. Time Elapsed: 373.012 s. Mean Reward: 4.507. Std of Reward: 1.511. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 370000. Time Elapsed: 381.973 s. Mean Reward: 4.685. Std of Reward: 1.143. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 380000. Time Elapsed: 396.210 s. Mean Reward: 4.540. Std of Reward: 1.442. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 390000. Time Elapsed: 413.856 s. Mean Reward: 4.693. Std of Reward: 1.077. Training.
[INFO] GetTarget. Step: 400000. Time Elapsed: 424.442 s. Mean Reward: 4.915. Std of Reward: 0.050. Training.
    
```

Рис. 7. Результати тренування ML-Agents

Джерело: розроблено авторами.

Після закінчення навчання було отримано модель у форматі «.onnx», яку можна інтегрувати у систему управління поведінкою агента.

Для аналізу процесу навчання представлено візуалізацію у вигляді графіків: кумулятивна винагорода, довжина епізоду. На рисунку 8 продемонстровано процес накопичення сумарної нагороди. Як видно з графіка, агент навчився слідувати за ціллю і поступово отримував винагороду з кожним проміжком кроків. Ця крива винагород доводить ефективність алгоритму навчання.

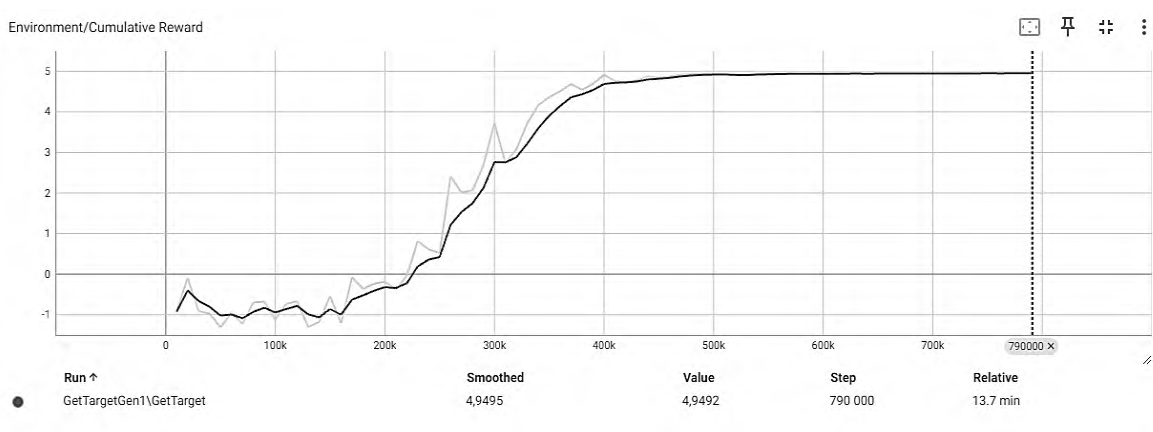


Рис. 8. Графік кумулятивної винагороди

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 9 можна побачити, що на початку навчання агент здійснює значно більше дій для досягнення мети, що свідчить про його недостатню навченість. Однак зі збільшенням кількості епізодів, агент поступово вчиться ефективніше виконувати завдання, що призводить до скорочення довжини епізоду досягнення цілі. Це означає, що агент стає дедалі більш компетентним у досягненні поставленої мети.

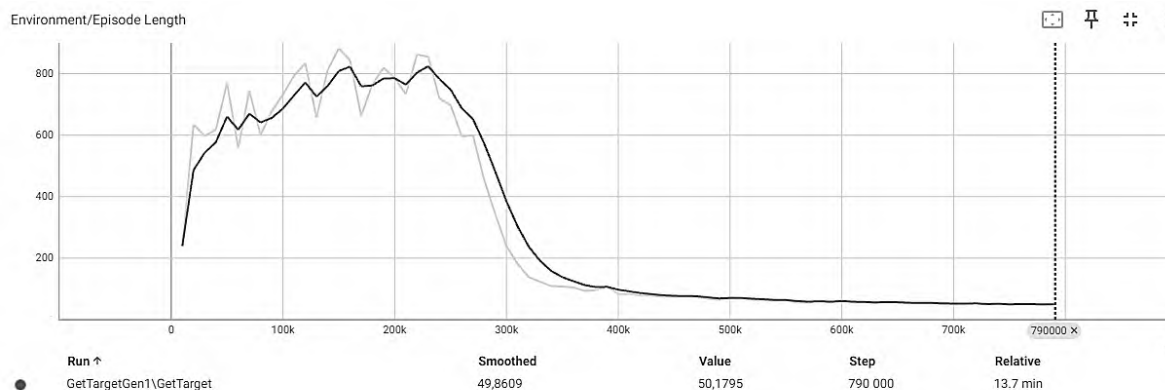


Рис. 9. Графік довжини епізоду

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. З розвитком технологій штучного інтелекту відкриваються ширші можливості створення інтелектуальних персонажів для комп'ютерних ігор, з більш реалістичною поведінкою, що сприяє глибшому зануренню в гру.

У роботі було проведено експеримент з навчанням некерованого гравцем персонажа. Для цього було обрано метод навчання з підкріпленням. Персонаж навчається шляхом правильних спроб та помилок, отримуючи винагороду або покарання. Головною метою навчання NPC було набуття досвіду переслідування рухомої цілі. Результати експерименту показали, що модель здатна на успішне навчання та ухвалення оптимальних рішень в ігровому середовищі.

Дослідження показало, що машинне навчання є потужним інструментом для розробки ефективного ігрового штучного інтелекту. Навчання з підкріплення відкриває нові можливості для розробки більш динамічних та непередбачуваних ігрових сценаріїв. Перспективним напрямком подальших досліджень вважаємо застосування методів машинного навчання для можливості надання неігровим персонажам емоцій, можливості вступати в діалог тощо.

Список використаних джерел

1. Сеніва, К. Р. Способи використання нейронних мереж та машинного навчання в комп'ютерних іграх / К. Р. Сеніва // Вісник Хмельницького національного університету. – 2021. – № 2 (295). – С. 97-100. DOI: <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2021-295-2-97-100>.
2. Шиманський, В. Аналіз методів машинного навчання для керування неігровими персонажами у грі виживання / В. Шиманський, В. Задерецький // XII Міжнародна науково-практична конференція «New integrations of modern education in universities», 05-08 грудня 2023 р., Амстердам, Нідерланди. – 2023. – С. 379-382. URL: <https://isg-konf.com/new-integrations-of-modern-education-in-universities>.
3. Almeida Rocha, D. Simulating Human Behaviour in Games using Machine Learning / D. de Almeida Rocha, J. Cesar Duarte // Proceedings of 18th Brazilian Symposium on Computer Games and Digital Entertainment (SBGames), Rio de Janeiro, Brazil. – 2019. – Pp. 514-523. DOI: <https://doi.org/10.1109/SBGames.2019.00030>.
4. Geisler, B. Integrated Machine Learning For Behavior Modeling in Video Games / B. Geisler // Radical Entertainment. – 2014. – Pp. 1-9.
5. Марчук, Г. Дослідження методів штучного інтелекту для створення інтелектуальних ігрових агентів / Г. Марчук, О. Коротун, В. Левківський, М. Українець // Технічні науки та технології. – 2024. – № 3 (37). – С. 122-131. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3\(37\)-122-131](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3(37)-122-131).
6. Nasteski, V. An overview of the supervised machine learning methods / V. Nasteski // HORIZONS.B. – 2017. – Vol. 4. – Pp. 51-62. DOI: <https://doi.org/10.20544/HORIZONS.B.04.1.17.P05>.
7. Plaat, A. Learning to Play / A. Plaat // Springer, Cham. – 2020. – P. 330. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59238-7>.

8. Wiederhold, G. Arthur Samuel: Pioneer in Machine Learning / G. Wiederhold, J. McCarthy // IBM Journal of Research and Development. – 1992. – Vol. 36, № 3. – Pp. 329-331. DOI: <https://doi.org/10.1147/rd.363.0329>.

9. Yang, L. On hyperparameter optimization of machine learning algorithms: Theory and practice / L. Yang, A. Shami // Neurocomputing. – 2020. – Vol. 415. – Pp. 295-316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.07.061>

10. Burnes, A. Introducing NVIDIA ACE For Games - Spark Life Into Virtual Characters With Generative AI [Electronic resource] / A. Burnes // NVIDIA. – 2023. – Access mode: <https://www.nvidia.com/en-us/geforce/news/nvidia-ace-for-games-generative-ai-npcs>.

11. Almón-Manzano, L. Reinforcement Learning in Agents' Training: Unity ML-Agents / L. Almón-Manzano, R. Pastor-Vargas, J.M.C. Troncoso // Bio-inspired Systems and Applications: from Robotics to Ambient Intelligence. IWINAC 2022. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. – 2022. – Vol. 13259. – Pp. 391-400. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06527-9_39.

References

1. Seniva, K.R. (2021). Sposoby vykorystannia neironnykh merezh ta mashynnoho navchannia v kompiuternykh ihrakh [Ways to use Neural Networks and Machine Learning in Computer Games]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Herald of Khmelnytskyi national university*, 2(295), 97-100. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2021-295-2-97-100>.

2. Shimanskyi, V., Zaderetskyi, V. (2023). Analiz metodiv mashynnoho navchannia dlia keruvannia neihrovymy personazhamy u hri vyzhyvannia [Analysis of machine learning methods for controlling non-playable characters in a survival game]. *XII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «New integrations of modern education in universities», Amsterdam, Niderlandy – Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference. Amsterdam, Netherlands.* (pp. 379-382). <https://isg-konf.com/new-integrations-of-modern-education-in-universities>.

3. Almeida Rocha, D., Cesar Duarte, J. (2019). Simulating Human Behaviour in Games using Machine Learning. *Proceedings of 18th Brazilian Symposium on Computer Games and Digital Entertainment (SBGames), Rio de Janeiro, Brazil*, 514–523. DOI: <https://doi.org/10.1109/SBGames.2019.00030>.

4. Geisler, B. (2014). Integrated Machine Learning for Behavior Modeling in Video Games. *Radical Entertainment*, 1-9.

5. Marchuk, G., Korotun, O., Levkivskyi, V., Ukrainets, M. (2024). Doslidzhennia metodiv shtuchnoho intelektu dlia stvorennya intelektualnykh ihrovnykh ahentiv [Research of artificial intelligence methods for creating intelligent game agents]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii - Technical Sciences and Technologies*, 3 (37), 122–131. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3\(37\)-122-131](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3(37)-122-131).

6. Nasteski, V. (2017). An overview of the supervised machine learning methods. *HORIZONS.B*, 4, 51-62. DOI: <https://doi.org/10.20544/HORIZONS.B.04.1.17.P05>.

7. Plaata, A. (2020). Learning to Play. *Springer, Cham*, 330. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59238-7>.

8. Wiederhold, G., McCarthy, J. (1992). Arthur Samuel: Pioneer in Machine Learning. *IBM Journal of Research and Development*, 36(3), 329–331. DOI: <https://doi.org/10.1147/rd.363.0329>.

9. Yang, L., Shami, A. (2020). On hyperparameter optimization of machine learning algorithms: Theory and practice. *Neurocomputing*, 415, 295–316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.07.061>

10. Burnes, A. (2023). Introducing NVIDIA ACE For Games - Spark Life Into Virtual Characters With Generative AI. *NVIDIA*. <https://www.nvidia.com/en-us/geforce/news/nvidia-ace-for-games-generative-ai-npcs>.

11. Almón-Manzano, L., Pastor-Vargas, R., Troncoso, J.M.C. (2022). Deep Reinforcement Learning in Agents' Training: Unity ML-Agents. Bio-inspired Systems and Applications: from Robotics to Ambient Intelligence. IWINAC 2022. Lecture Notes in Computer Science. *Springer, Cham*, 13259, 391–400. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06527-9_39

Отримано 04.12.2024

Vitalii Levkivskyi¹, Galyna Marchuk², Oleksandr Moskalyk³

¹PhD in Software Engineering, Associate Professor of the Department of Computer Sciences
Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: levkivskyi@ztu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1643-0895>. **ResearcherID:** [GYU-9377-2022](https://orcid.org/0000-0002-1643-0895)

²Senior Lecturer of the Department of Computer Sciences
Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: pzs_mgv@ztu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2954-1057>. **ResearcherID:** [AAD-7514-2022](https://orcid.org/0000-0003-2954-1057)

³Master's student of the Department of Computer Sciences
Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: alexundercover191@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-6555-1545>

**GAME ARTIFICIAL INTELLIGENCE MODEL
FOR NON-PLAYABLE CHARACTERS**

Artificial intelligence in video games plays a crucial role in shaping gameplay, and its creation has always been a complex and challenging task. Developing effective game artificial intelligence requires understanding and knowledge of many aspects, including algorithms, rules, and strategies that a created artificial intelligence will follow. Applying machine learning methods to create an artificial intelligence model opens up many opportunities to accelerate and optimize game development processes and improve the behavior of non-playable characters, and consequently, the overall player experience. One type of machine learning is reinforcement learning, which involves receiving rewards for correct behavior or penalties for mistakes. In this process, a non-playable character gains experience interacting with the external environment.

The aim of the work is to explore the possibilities of using the reinforcement learning method to develop a game artificial intelligence model for a non-playable character capable of self-learning and pursuing other game characters. Training non-playable characters is a key task for creating exciting and realistic game environments. The primary goal of NPC training was to ensure the ability to effectively pursue a moving target. The experimental results confirmed that the developed model successfully learns and makes optimal decisions in a game environment. The study proved the effectiveness of using machine learning methods in creating game artificial intelligence. In particular, reinforcement learning opens up new horizons for developing adaptive and unpredictable scenarios in games. Promising areas for further research include integrating machine learning methods to provide non-playable characters with additional capabilities that will contribute to a deeper player immersion in the gameplay.

Keywords: Artificial Intelligence; Game; Non-Playable Character; Machine Learning; Model; Reinforcement Learning; NPC.
Figures: 9. **References:** 11.

Владислав Дмитрович Байда¹, Олександр Анатолійович Велігорський²

¹аспірант 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>

²завідувач кафедри радіотехнічних та вбудованих систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: o.veligorskiy@stu.cn.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8256-7339>
Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ>

МЕТОДИКА ПОРІВНЯННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОБУДОВИ ДИСТАНЦІЙНИХ ЛАБОРАТОРІЙ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У статті проведено аналіз та порівняння сучасних інформаційних технологій, які використовуються для побудови дистанційних лабораторій апаратного забезпечення для технічної освіти. Окреслено архітектурні рішення, що використовуються в існуючих системах, а також проаналізовані їхні переваги та недоліки. Запропоновано методику порівняння таких систем за комплексом критеріїв, які включають рівень технологій, оновлення та підтримка, можливість інтеграції з системами управління навчанням, простота, швидкодія в real-time режимі та простота конфігурації. На основі цієї методології здійснено порівняльний аналіз існуючих систем і визначено фреймворк LabDiscoveryEngine як найбільш оптимальну технологію.

Ключові слова: дистанційні лабораторії; апаратне забезпечення; архітектура програмного забезпечення; розподілені системи; дистанційне навчання.

Рис.: 6. Табл.: 1. Бібл.: 27.

Актуальність теми дослідження. Стрімкий розвиток інформаційних технологій та глобальні виклики останніх років суттєво змінили підходи до організації освітнього процесу, особливо в галузі технічних наук. Епідемія коронавірусу, яка охопила світ, у тому числі й Україну, змусила освітні установи швидко адаптуватися до нових реалій та шукати ефективні способи дистанційного навчання. Ця ситуація загострила потребу в розробці та впровадженні систем дистанційних лабораторій, зокрема для вивчення апаратного забезпечення електронних пристроїв та систем.

Необхідність дослідження сучасних систем дистанційних лабораторій апаратного забезпечення особливо помітна в наш час в Україні, де через військові дії багато студентів та викладачів змушені працювати та навчатися віддалено. У цих умовах забезпечення якісної технічної освіти стає не лише освітнім, але і стратегічним завданням для підтримки та розвитку країни як тепер, так і в майбутньому, оскільки вони дозволяють студентам проводити експерименти та виконувати практичні завдання незалежно від їхнього фізичного місцезнаходження та досягати практикоорієнтованих результатів навчання, які вимагаються конкретною галуззю знань та спеціальністю. Крім цього, це також важливо для студентів з обмеженими можливостями для пересування [1].

Варто також зауважити, що віртуальні та дистанційні лабораторії також сприяють розвитку навичок самостійної роботи та самонавчання у студентів, оскільки, здобувачі вищої освіти з використанням дистанційних технологій можуть працювати у власному темпі, обираючи час, який підходить для них якнайкраще. Крім цього, з використанням дистанційних лабораторій, вони можуть повторювати експерименти стільки разів, скільки потрібно для повного засвоєння матеріалу. Усе це суттєво підвищує ефективність навчання та сприяє формуванню у студента важливих професійних компетенцій [2] та досягнення програмних результатів навчання.

Нарешті, дистанційні та віртуальні лабораторії готують студентів до роботи в сучасному цифровому світі, де віддалена робота та взаємодія з обладнанням через інтернет стають все більш поширеними. Це допомагає формувати навички, які будуть затребувані на ринку праці в майбутньому [4].

Також дистанційні лабораторії сприяють більш ефективному використанню ресурсів навчальних закладів. Вони дозволяють оптимізувати використання дорогого обладнання шляхом збільшення кількості студентів, які можуть з ним працювати, без необхідності придбання додаткових фізичних установок. Це можливе, зокрема, завдяки тому факту, що дистанційна та/або віртуальна лабораторія може використовуватися не тільки в години, у які студент, навіть при очній формі навчання, перебувають в університеті, а й надає можливість виконувати роботу в домашніх умовах. Це значно економить кошти навчальних закладів [5].

Дистанційні лабораторії базуються на двох окремих програмних складових. Перша, основна, спрямована на безпосередню підтримку виконання лабораторної роботи, взаємодії користувача з обладнанням через людино-машинний інтерфейс, давачі та виконавчі механізми. Друга, допоміжна, спрямована на задачі «високого рівня», пов'язані з розподіленням доступу до обмеженої кількості обладнання в умовах, коли кількість студентів перевищує кількість одиниць лабораторного обладнання, обмеження тривалості сесії, інтеграції із системами керування навчанням (Learning Management Systems, LMS) [3].

Дистанційні лабораторії мають певну схожість з погляду роботи з ними з віртуальними лабораторіями [5], але мають велику перевагу у вигляді надання студенту відчуття роботи з реальним обладнанням, що значно покращує досвід навчання [6], тому питання створення саме дистанційних лабораторій є актуальним у наш час.

Таким чином, дослідження та систематизація сучасних систем дистанційних лабораторій апаратного забезпечення є надзвичайно актуальним з огляду на поточні глобальні та локальні виклики, з якими стикається освітня галузь. Воно спрямоване на пошук інноваційних рішень для забезпечення безперервності та якості технічної освіти в умовах дистанційного та змішаного навчання.

Постановка проблеми. Як було зазначено вище, у поточній ситуації в країні, а також при будь-яких інших кризових ситуаціях, що ускладнюють та/або унеможливають повноцінне вивчення студентами навчальних предметів, які стосуються навичок роботи з реальним обладнанням, виникає гостра необхідність у розробці та впровадженні ефективних систем дистанційних лабораторій. Ці системи повинні забезпечувати якісну практичну підготовку студентів технічних спеціальностей в умовах віддаленого навчання.

При цьому основною проблемою є те, що традиційні методи отримання практичних навичок роботи з реальним електронним обладнанням, вивчення їхнього апаратного та вбудованого програмного забезпечення вимагають безпосереднього фізичного доступу до обладнання, що стає неможливим в умовах дистанційного навчання. Це створює значний розрив між теоретичними знаннями та практичними навичками студентів, що може негативно вплинути на якість підготовки майбутніх фахівців у галузі комп'ютерної інженерії та суміжних дисциплін.

Станом на сьогодні вже відомі низка підходів до розробки віддалених лабораторій для навчання студентів спеціальностей електронного спрямування, однак, часто вони не відповідають сучасним вимогам до інтерактивності, реалістичності та масштабованості. Вони можуть бути обмежені у функціоналі, не забезпечувати достатньої взаємодії з реальним обладнанням або бути занадто складними у впровадженні та підтримці. Крім цього, вони мають різні підходи до забезпечення взаємодії користувача з обладнанням, архітектурної побудови системи, що ускладнює їх порівняння та вибір найкращого підходу.

Таким чином, постає необхідність у дослідженні, детальному аналізі та порівнянні сучасних систем дистанційних лабораторій апаратного та вбудованого програмного забезпечення електронних систем з метою виявлення їхніх переваг, недоліків та потенціалу для вдосконалення. Це дослідження має охопити технічні аспекти впровадження таких систем у навчальний процес.

Важливо також визначити, які саме компоненти та характеристики систем дистанційних лабораторій є ключовими для забезпечення ефективного навчання в умовах віддаленого доступу. Це включає аспекти інтерфейсу користувача, методи регулювання питань доступу великої кількості користувачів до обмеженої кількості стендів з апаратним забезпеченням, механізми забезпечення безпеки та надійності роботи з віддаленим обладнанням.

Вирішення цієї проблеми дозволить не тільки адаптувати освітній процес до поточних викликів, але і створити основу для більш гнучкої та доступної системи технічної освіти в майбутньому, здатної швидко реагувати на зміни в зовнішньому середовищі та забезпечувати високу якість підготовки фахівців незалежно від фізичного місцезнаходження студентів та викладачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що питання використання віддалених лабораторій, що надають вебінтерфейс для доступу до реального обладнання, є актуальним і потребує дослідження [1].

Дослідження [7] показує, що впровадження дистанційної лабораторії ПЛІС у навчання студентів у Національному університеті Ірландії не тільки підвищило загальні кількісні показники взаємодії студентів з лабораторією у порівнянні з суто фізичною лабораторією, а й підвищило середній бал за екзамен з 57 до 65 % у порівнянні з минулим (до впровадження системи дистанційних лабораторій ПЛІС) роком, що у свою чергу зображує кореляцію між наявністю можливостей для виконання лабораторних робіт віддалено та успішність студентів. Щоправда, в дослідженні брало участь усього 16 студентів.

Дослідження, проведене в Папському католицькому університеті Ріо-де-Жанейро [8], виявило цікаву тенденцію: багато студентів активно використовували віддалені лабораторії у вечірній та нічний час. Це спостереження підкреслює перевагу дистанційних лабораторій - вони дозволяють задовольнити потребу студентів у проведенні експериментів поза традиційними годинами роботи навчального закладу. Завдяки такому формату навчання, студенти отримують можливість працювати з лабораторним обладнанням майже в будь-який зручний для них час, що було б неможливо при традиційному форматі організації лабораторних занять.

Разом зі зростаючим попитом на дистанційні лабораторії в цілому, росте зацікавленість і в лабораторіях розширеної реальності (Extended Reality, XR), про що свідчить дослідження [6]. Використання розширеної реальності в системах дистанційної лабораторії, на думку авторів дослідження [6], дозволить покращити рівень «занурення» користувачів у виконання лабораторних робіт. Іншими словами, ідея полягає в наданні більш реалістичного досвіду роботи в дистанційних лабораторіях, аніж людино-машинний інтерфейс на основі миші та клавіатури як органів керування і зображення на моніторі як органа спостереження за фізичним станом віддаленої лабораторії.

Дослідження [9] показує, що зацікавленість в створенні симульованих та віддалених лабораторіях це не тільки нове явище, що пов'язане з викликами сьогодення, а досліджується вже як мінімум з 2006 року, про що свідчить дата публікації оглядової статті [9].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на зростаючий інтерес до систем дистанційних лабораторій апаратного забезпечення, а також наявність певної кількості підходів у реалізації таких систем, станом на сьогодні немає наукових робіт, що аналізують поточний стан розвитку систем дистанційних лабораторій, узагальнюють підходи й методи, що в них використовуються, а також порівнюють їх за чітко сформованою методологією, роблячи висновки про переваги й недоліки кожної окремо взятої системи. Крім цього, станом на сьогодні, немає загального та спільного підходу (архітектури) до побудови систем дистанційних лабораторій для використання в дистанційному освітньому процесі для студентів технічних спеціальностей електронного спрямування.

Вирішення зазначених недосліджених програм дозволить майбутнім розробникам обрати найкращу архітектуру та програмні компоненти для розробки такої лабораторії.

Метою статті є аналіз, огляд та класифікація існуючих систем дистанційних лабораторій апаратного забезпечення, а також створення нової методології порівняння існуючих систем, і її використання задля вибору найкращої архітектури побудови дистанційних лабораторій.

Виклад основного матеріалу. Віддалені лабораторії з реальним обладнанням являють собою системи, які дозволяють студентам керувати фізичними приладами та проводити експерименти через інтернет. На рис. 1 зображено структурну схему типової віддаленої лабораторії, яка складається з:

1. Користувача.
2. Лабораторного сервера (Laboratory Server): елемент, який потрібний для цілей реалізації черги доступів до обладнання, збереження інформації про сесії, інтеграції з системами керування навчанням тощо.
3. Блоку контролю (Controlling block): елемент, що слугує для керування апаратним забезпеченням, а саме: встановлення сигналів, завантаження вбудованого програмного забезпечення, вимірювання сигналів на виході тощо.
4. Апаратного забезпечення (Hardware): власне саме апаратне забезпечення, що вивчається користувачем.
5. Опціонально в лабораторії може бути використана відеокамера, яка забезпечуватиме трансляцію обладнання, якщо це важливо для виконання лабораторної роботи (наприклад, шляхом візуального контролю за переміщенням рухомих частин, індикації на обладнанні тощо).

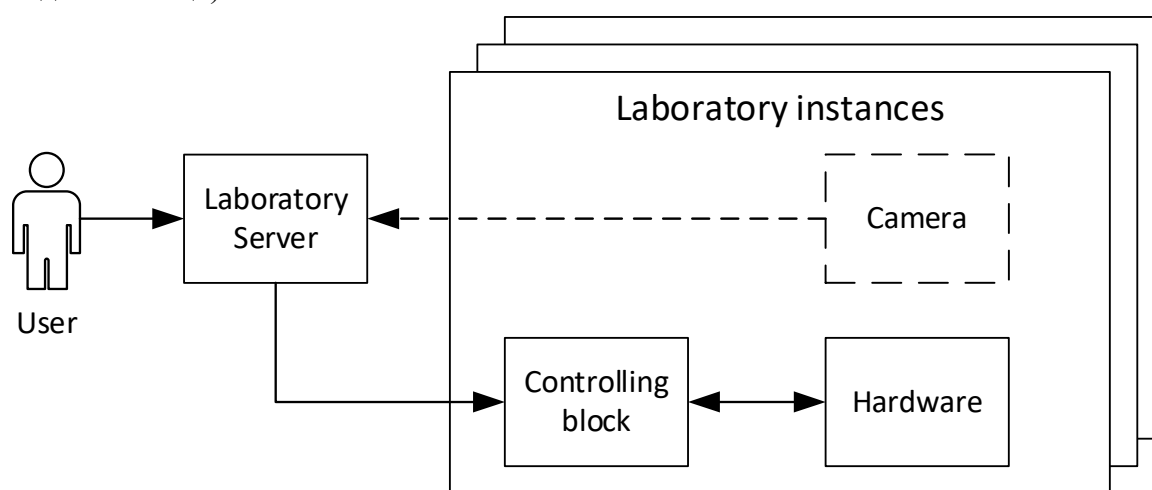


Рис. 1. структурна схема типової віддаленої лабораторії

Джерело: розроблено авторами.

Блок «Лабораторний сервер» здебільшого не є унікальним для кожної конкретної лабораторії, а має виконувати ті самі допоміжні задачі, такі як аутентифікація, авторизація, створення черги користувачів, бронювання лабораторії тощо [10; 11]. Тому постає необхідність у створенні додаткових програмних компонентів системи віддалених лабораторій, які можуть спростити створення дистанційних лабораторій шляхом реалізації однієї або багатьох таких функцій:

1. Надання доступу до безпосередньо інтерфейсу віддаленої лабораторії.
2. Аутентифікації та авторизації користувачів.
3. Створення черги для користувачів у разі перевищення кількості лабораторій кількістю користувачів.

4. Інтеграція з LMS, за допомогою якої викладачі можуть відслідковувати прогрес кожного окремого студента.

Такі програмні компоненти часто називають Remote Laboratory Management System (RLMS), оскільки вони виконують загальні задачі керування лабораторією.

WebLabDeusto та LabDiscoveryEngine. Станом на сьогодні відомі декілька таких систем, однією з таких систем є *LabDiscoveryEngine*, яка являє собою з відкритим вихідним кодом, що створена з використанням мови програмування Python [12]. Вона є логічним продовженням системи *WebLabDeusto* [13], що була розроблена в університеті Деусто в Іспанії. Варто зазначити, що *WebLabDeusto* є застарілою з технічного погляду в порівнянні з *LabDiscoveryEngine*, оскільки перша використовує Python версії 2 в той час, коли актуальною є версія 3. Помітно, що розвиток *WebLabDeusto* був зупинений у зв'язку з початком роботи над *LabDiscoveryEngine*, про що свідчить історія змін на github сторінці даної системи, остання зміна у якій (на момент написання статті) була зроблена 31 серпня 2022 року [14].

WebLabDeusto за замовчуванням виконує такі функції як складова дистанційної лабораторії:

1. Резервація певної лабораторії для використання користувачем.
2. Аутентифікація користувача.
3. Авторизація користувача.
4. Планування (черга користувачів).
5. Відстежування активності користувачів (вхід в систему, вихід з системи тощо).
6. Комунікація користувача з «блоком контролю» з рис. 1 [13].

Ця система може працювати в двох режимах:

1. Керована лабораторія (Managed laboratory).
2. Некерована лабораторія (Unmanaged laboratory).

У режимі керованої лабораторії *WebLabDeusto* повністю контролює комунікацію між клієнтом і сервером експерименту. Розробникам надано API та бібліотеку *WebLabDeusto* для створення клієнтської (переважно з використанням мови JavaScript) та серверної (з мовами програмування та технологіями Python, Java, .NET, C, C++, Node.js, LabVIEW тощо) частин лабораторії. Цей підхід добре підходить для команд, які менш досвідчені у веброзробці, оскільки *WebLabDeusto* бере на себе більшість складних аспектів.

У режимі некерованої лабораторії розробники мають більше свободи у виборі технологій та фреймворків для створення вебдодатка лабораторії, оскільки *WebLabDeusto* в цьому випадку відповідає лише за базові функції, такі як планування, аутентифікація та авторизація. Комунікація відбувається безпосередньо між клієнтом і сервером лабораторії. Цей підхід підходить для досвідчених веброзробників та складніших лабораторій.

WebLabDeusto підтримує різні типи некерованих лабораторій, включаючи використання бібліотеки *weblablib* для Python, HTTP-інтерфейс для будь-яких вебтехнологій, експериментальну підтримку *LabVIEW Remote Panels* та обмежену підтримку віртуальних машин.

Під HTTP-інтерфейсом мається на увазі те, що *WebLabDeusto* не вимагає від розробників, які хочуть використати систему задля отримання переваг, що описані вище, використання конкретних мов програмування і технологій, а дозволяє створювати на основі будь-яких технологій застосунки, що лише мають реалізувати певний набір операцій за допомогою протоколу HTTP та API, який описаний у документації.

Система забезпечує гнучкість у розгортанні, підтримує інтеграцію з системами управління навчанням (LMS) та федерацію лабораторій [10; 11] між різними установами, забезпечуючи доступ до ресурсів закладу-партнера з аналогічною дистанційною лабораторією, якщо всі екземпляри в першому закладі вже зайняті, у той час як у черзі все ще є охочі отримати доступ. *WebLabDeusto* також надає інструменти для аналітики навчання та моніторингу використання лабораторій.

Вибір між керованим та некерованим підходом залежить від досвіду розробників, складності лабораторії та конкретних вимог проєкту. *WebLabDeusto* прагне забезпечити гнучкість, щоб задовольнити різноманітні потреби в галузі віддалених лабораторій для освіти та досліджень [13].

На основі системи *WebLabDeusto* побудовано систему *LabsLand*, яка являє собою набір дистанційних лабораторій, що фізично розташовані в різних частинах світу. За допомогою даної системи, користувачі можуть отримати доступ до реального обладнання в будь-якій підключеній до системи лабораторії [15].

З точки зору організації архітектури, дистанційні лабораторії, що побудовані з використанням *WebLabDeusto*, остання виступає лабораторним сервером з рис. 1. Вона пере-направляє клієнтський застосунок до блоку контролю, що дозволяє самій *WebLabDeusto* бути лише прошарком і не залежати від конкретних лабораторій та експериментів.

Розробники системи *LabDiscoveryEngine*, яка, як було зазначено вище, є логічним продовженням системи *WebLabDeusto*, надають для використання інструмент *LabDiscoveryLib* з відкритим вихідним кодом [12]. Це бібліотека використовує мікро-фреймворк *Flask*, що базується на мові програмування *Python*. Вона спрощує створення дистанційних лабораторій, оскільки реалізує в собі той HTTP-інтерфейс, про який йшла мова вище, надаючи розробнику можливість використати його за допомогою декораторів в мові програмування *Python*.

Крім того, ця бібліотека, виходячи з документації [16], надає такі елементи функціональності:

1. Фонові задачі (Tasks), що виконуються в окремих потоках.
2. Підтримка протоколу *WebSockets*.
3. Підтримка багатьох лабораторій на одному сервері.
4. Використання користувачів з бази даних.
5. Сторінка для користувачів, що не мають доступу до системи.
6. Керування обмеженнями по часу.
7. Підтримка протоколу *http*.
8. Керування потоками та процесами.
9. Інтернаціоналізація (*i18n*).
10. Базова URL, що надає змогу реалізовувати більш, ніж одну лабораторію на одному сервері.

Для конфігурації лабораторій використовується файл у форматі *YAML*, де вказуються IP адреси конкретних блоків контролю (наприклад, застосунків з використанням бібліотеки *LabDiscoveryLib*) і певні теги, що слугують для кастомізації лабораторій.

На рис. 2 зображено структурну схему *LabDiscoveryEngine*, яка спільна так само і для *WebLabDeusto* з єдиною відмінністю в тому, що використовуються нові технології (*LabDiscoveryEngine* та *LabDiscoveryLib* замість *WebLabDeusto* та *WebLabLib*). Під “Custom Backend” мається на увазі те, що *LabDiscoveryLib* є лише опцією, якою можна знехтувати й написати власну реалізацію блоку контролю.

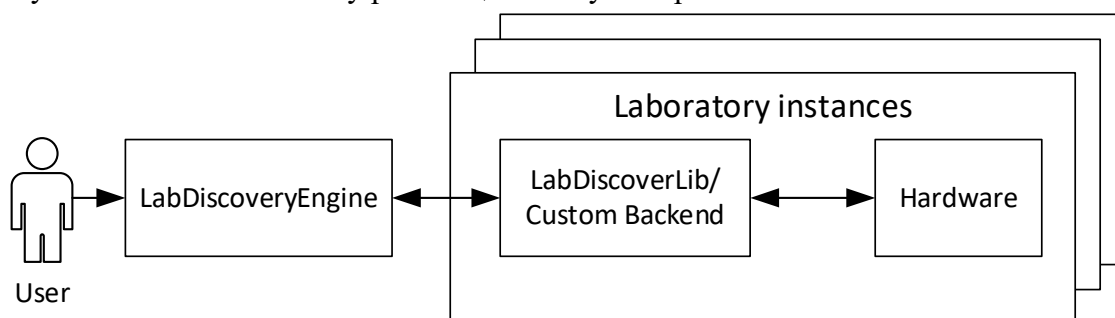


Рис. 2. Структурна схема системи *LabDiscoveryEngine*

Джерело: розроблено авторами.

Дистанційні лабораторії в системі iLab. Іншою системою дистанційної лабораторії є *iLab*, проект якої було розпочато в 1998 році в Массачусетському технологічному університеті в США. Основною причиною для створення системи, як зазначено в [17], була відсутність лабораторної складової курсу з напівпровідникових пристроїв в університеті, і було вирішено зробити лабораторні роботи з можливістю дистанційного доступу. Проект розвивався з часом і в 2003 році з'явився курс, що є предметом бакалаврату в Університеті Чалмерса в Швеції, на якому навчалися 350 студентів [17; 18].

Спочатку кожна лабораторія *iLab* розроблялася окремо, без використання спеціальних фреймворків. Згодом розробники *iLab* усвідомили, що розробляти кожен лабораторію і кожен експеримент з нуля є витратною по часу задачею. Крім того, у таких лабораторіях була помічена проблема підвищеного навантаження на менеджера лабораторій [17]. Таким чином почалася робота над *iLab Shared Architecture*, метою якої було підвищити масштабованість як процесу розробки дистанційних лабораторій, так і їхнього менеджменту.

Ця система реалізує ідею розподілення лабораторних експериментів на 3 категорії:

1. Серійні експерименти (*batched experiments*): експерименти, у яких весь хід роботи може бути описано та визначено заздалегідь. Наприклад, експерименти з FPGA, де чітко наперед прописані сигнали, що подаються на цифрову схему.

2. Інтерактивні експерименти (*interactive experiments*): експерименти, у яких студенту необхідним є доступ до лабораторії в режимі реального часу з можливістю впливати на систему, що досліджується.

3. Сенсорні експерименти (*sensor experiments*): у таких експериментах користувачі аналізують потоки даних у режимі реального часу, але не впливають на дані, що вимірюються [17].

Ідея полягає в тому, що інфраструктура під різні типи може бути різною. Так, наприклад, для експериментів другого типу зручно використати або чергу користувачів на експеримент, або бронювання певних часових інтервалів. Водночас для збільшення ефективності системи дистанційних лабораторій, експерименти першого типу можна проводити в режимі офлайн: користувач завантажує певний файл, що несе в собі інструкції з виконання лабораторної роботи, далі він може від'єднуватися від RLMS і чекати, поки не з'являться результати виконаної ним роботи.

Архітектура *iLab Shared Architecture* для серійних експериментів (*batched experiments*) зображена на рис. 3, яка досить схожа на зображену на рис. 1, та складається з:

1. Клієнтського застосунку *User*, який є унікальним для конкретного експерименту.
2. Лабораторного сервера, *Service Broker* в термінології *iLab*.
3. Блоку контролю, *Lab Server* у термінології *iLab*, який також є унікальним для конкретного експерименту.

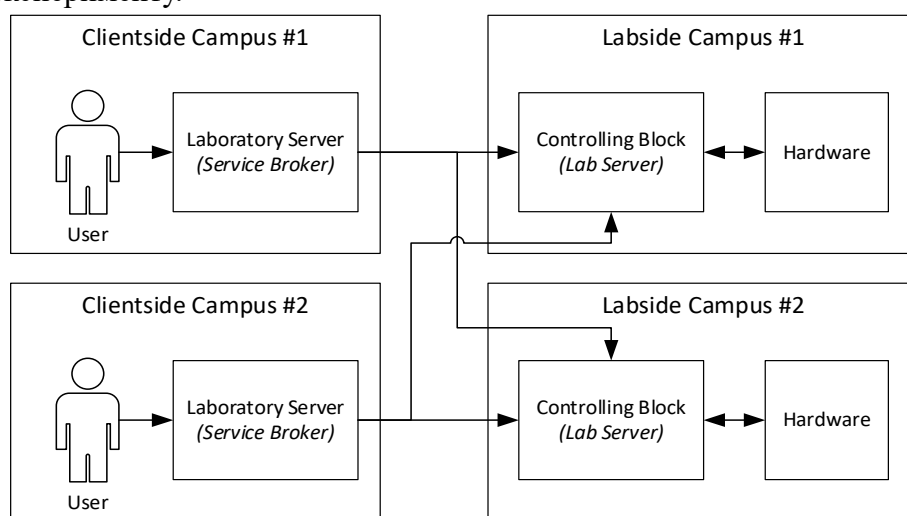


Рис. 3. Топологія архітектури *iLab* для серійних експериментів на основі [17]
Джерело: розроблено авторами.

Для комунікації в системі використовується кодування XML, який у нас час поступається популярністю та розповсюдженістю формату JSON.

З метою проведення дистанційного експерименту за допомогою *iLab*, користувач спочатку авторизується на лабораторному сервері, обирає експеримент, після чого у нього відкривається відповідний клієнтський застосунок, в який він, в свою чергу, вводить необхідні для проведення експерименту дані. Лабораторний сервер отримує ці дані і згодом відправляє блоку керування на обробку (власне виконання експерименту).

Іншими словами, принцип дії помітно відрізняється від *WebLabDeusto* та *LabDiscoveryEngine*, де лабораторний сервер лише перенаправляє користувацький застосунок до блоку контролю. Вся інформація про виконання експерименту зберігається на лабораторному сервері, і весь хід виконання роботи керується лабораторним сервером.

На рис. 4 зображено топологію архітектури для інтерактивних експериментів, яка помітно відрізняється від зображеної на рис. 2.

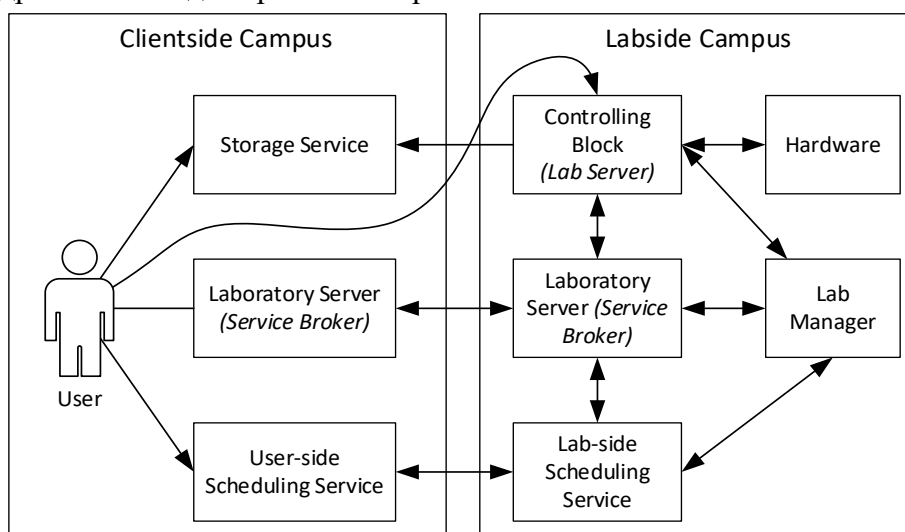


Рис. 4 - Топологія архітектури *iLab* для інтерактивних експериментів, основана на [17]
Джерело: розроблено авторами.

У випадку з архітектурою *iLab* для інтерактивних експериментів, лабораторний сервер не використовується як єдиний вузол системи, через який відбувається комунікація між клієнтським застосунком та блоком контролю. Він же слугує для авторизації користувачів шляхом створення ключів доступу. В даній конфігурації підхід більш схожий на той, що використовується в *WebLabDeusto* та *LabDiscoveryEngine*, бо після початкового етапу користувацький застосунок та блок контролю починають взаємодіяти напряму, без використання зайвої ланки у вигляді лабораторного сервера.

Також, в даній архітектурі вводяться сервіс зберігання (Storage Service), необхідний для збереження даних щодо виконання експериментів та сервіси планування (Scheduling Services) задачі яких описані в [17] і [18]. Недоліком цього є складність системи, при чому система починає мати набагато більше складових, аніж у попередньо розглянутих архітектурах. Наприклад, в *iLab* використовуються сервіси планування (до того ж їх існує два типи [17]) для задач скидання стану лабораторії для початкового перед тим, як надати користувачу, який забронював певний час, доступ до лабораторії. І хоча ця функціональність справді є необхідною в деяких випадках, вона може бути реалізована простіше, без залучення додаткового сервісу, як це зроблено в *LabDiscoveryEngine*: в останньому блок керування має змогу самостійно сповістити лабораторний сервіс про готовність до завершення поточної сесії, або ж зробити необхідні речі перед початком нової сесії. Крім цього, недоліком також є відсутність підтримки інтеграції з LMS [19; 20], а також те, що з 2019 року проєкт є закритим.

Дистанційні лабораторії VISIR.

Іншою системою дистанційних лабораторій є *VISIR*, що була розроблена в Технологічному інституті Блекінге, Швеція. Дана система близько 10 років використовувалася в університеті Деусто в Іспанії розробниками *WebLabDeusto* та *LabDiscoveryEngine*. За результатами експлуатації ними було опубліковано дослідження [22], в якому наводяться переваги використання даної системи в університеті. Аналогічно, про позитивний вплив даної системи на навчання вказує дослідження [24].

Технологія *VISIR*, як зазначено у [25], складається з таких програмних компонентів (рис. 5): вебінтерфейс користувача, клієнт експерименту, сервер вимірювань та сервер експерименту. Вебінтерфейс користувача базується на мові PHP, у той час як клієнт експерименту – на Adobe Flash, він реалізує віртуальний інтерфейс для обладнання (осцилограф, мультиметр, генератор, макетна плата тощо). Сервер вимірювань реалізовано на мові Microsoft Visual C++, він здійснює авторизацію, автентифікацію, контроль часу експерименту та взаємодію користувача (клієнт експерименту) з обладнанням (сервер експерименту). Особливістю серверу експерименту є те, що він реалізований на LabView, що суттєво ускладнює розробку власних дистанційних лабораторій у випадку, якщо заклад не має відповідної ліцензії на програмне забезпечення. Крім цього, для роботи дистанційної лабораторії необхідне спеціалізоване апаратне забезпечення, яке складається з друкованих плат, розроблених винахідниками цієї технології, а також спеціалізованої комп'ютерної платформи PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) або LXI (LAN eXtensions for Instrumentation) виробництва компанії National Instruments.

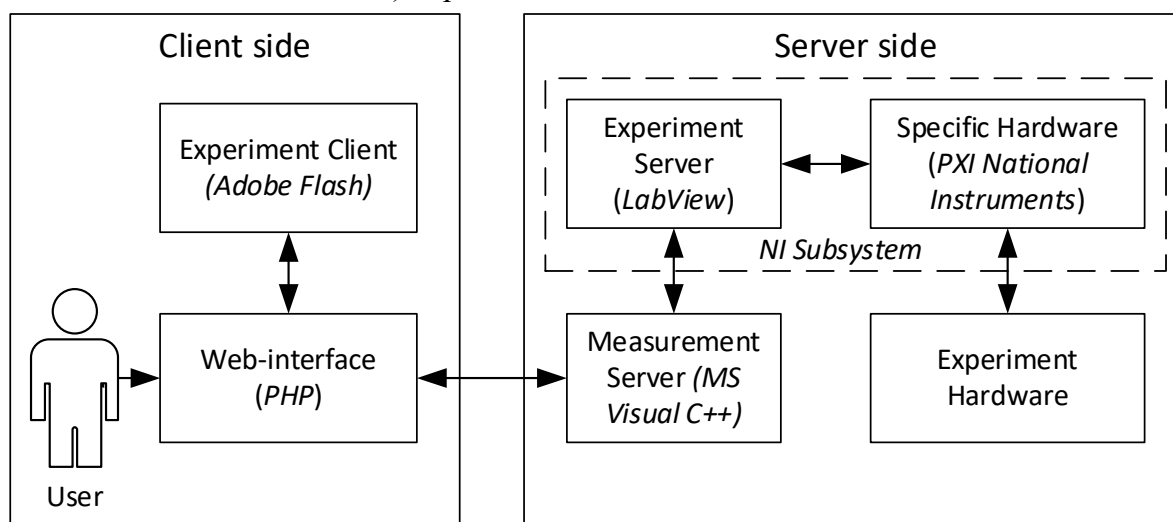


Рис. 5. Топологія архітектури *VISIR*

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 6 зображено зовнішній вигляд апаратного забезпечення системи *VISIR*, знизу – обладнання PXI від National Instruments, зверху – стек друкованих плат, на яких реалізовано комутацію електричних компонентів відповідно до схеми, яку користувач синтезує в клієнті експерименту. Така система використовує реле для перемикавання компонентів електричної схеми, які спрацьовують досить швидко, після чого вона робить виміри. Оскільки час перемикавання реле і вимірювання напруги досить невеликий для людини, то ця система має змогу обробляти багатьох користувачів псевдопаралельно, реалізуючи таким чином роботу майже в режимі реального часу [23].

У роботі [26], яка була опублікована у 2011 році, розкрито плани зі створення *VISIR Open Lab Platform 5.0*, яка має підтримувати федерацію і репозиторії для розповсюдження навчальних матеріалів. Запропонована архітектура платформи складається з двох

хмар: відкритого репозиторію навчальних матеріалів та мережі онлайн-лабораторій, що базуються на VISIR 5.0. Метою такої архітектури є створення можливості взаємодії університетів та інших навчальних закладів між собою шляхом спільного використання дистанційних лабораторій.

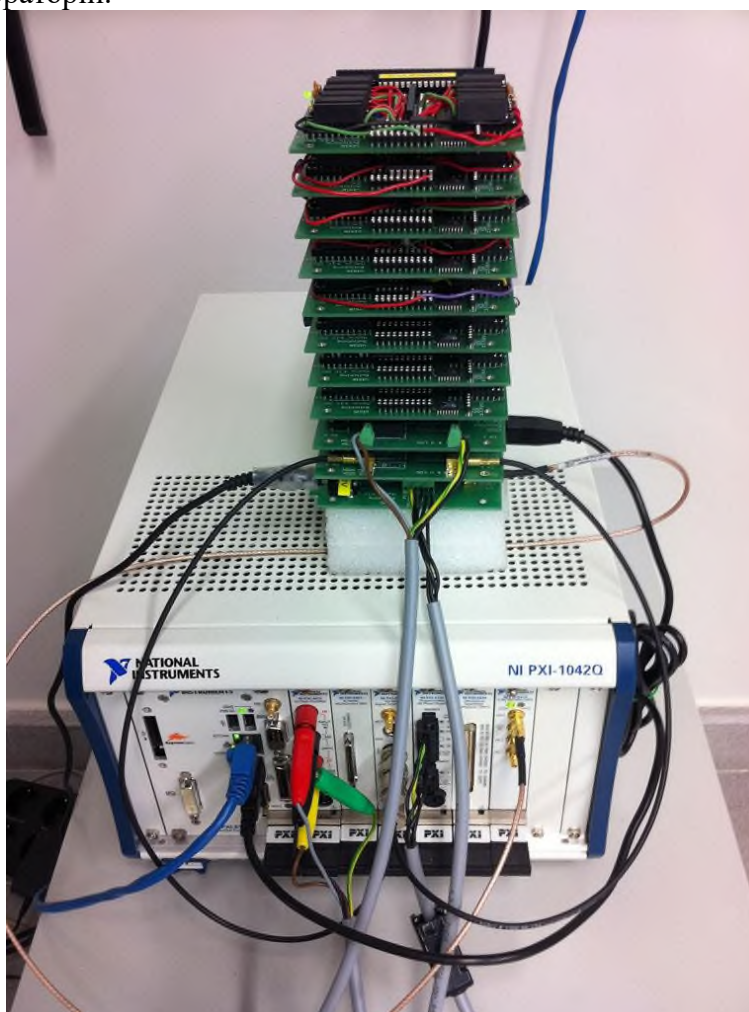


Рис. 6. Зовнішній вигляд системи VISIR [23]

Дистанційні лабораторії у системі Framework for remote experiments in education. Іншою системою є *FREE* (Framework for remote experiments in education) [27], побудована з використанням Python, Django.

Архітектура цієї системи збігається з тією, що зображена на рис. 1, включаючи підтримку відеозображення.

Аналогічно до *WebLabDeusto* та *LabDiscoveryEngine*, ця система вимагає від розробників нової лабораторії лише написання клієнтської частини по взаємодії з експериментом та серверу, який реалізує певний HTTP інтерфейс. Таким чином, система є досить гнучкою та легкою в розвитку і розробці.

Система підтримує можливість інтеграції з деякими системами авторизації, наприклад з Google та Microsoft шляхом використання протоколу OAuth, а також з LMS.

З точки зору конфігурації, *FREE* використовує принципово інший у порівнянні з іншими системами підхід, оскільки в ній блоки контролю самостійно «реєструються» на лабораторному сервері, а не лабораторний сервер конфігурують так, щоб він «знав» про існування блоків контролю по конкретних IP-адресах. Такий підхід дає додаткову зручність у конфігурації, але може нести за собою проблеми з безпекою.

Суттєвою відмінністю від *WebLabDeusto/LabDiscoveryEngine* є те, що в архітектурі *FREE* весь трафік від користувача до блоку контролю проходить через лабораторний сервер, при цьому останній ці дані ніяк не інтерпретує, а слугує лише як проксі-сервер. З одного боку це дає можливість зберігати всі дані про виконані студентами експерименти централізовано, а з іншого – збільшує навантаження на мережу та підвищує мережеву затримку між користувачем та експериментом. Також, судячи з опису в [26], для реалізації потоку даних від блока керування до користувача використовується підхід, у якому користувачський застосунок періодично опитує лабораторний сервер для отримання актуальних даних, що, своєю чергою, може мати негативний вплив на експерименти, для яких важливе виконання в реальному часі, тобто ті, де швидкість оновлення даних та їхня актуальність є важливими, як, наприклад, у системах з використанням осцилографа.

Система реалізує власний набір API для взаємодій «клієнт – лабораторний сервер» та «лабораторний сервер – блок контролю взаємодій», який містить мінімально достатню функціональність для роботи дистанційної лабораторії, але має обмеження щодо обміну даними між користувачьким застосунком та блоком контролю, описані вище.

Таким чином, розглянуті технології мають як переваги, так і недоліки, тому для вибору оптимальної технології необхідно розробити методіку порівняння та, відповідно до неї, провести порівняльний аналіз.

Методика порівняння інформаційних технологій дистанційних лабораторій. Задля порівняння систем між собою, авторами запропоновано наступну методіку порівняння інформаційних технологій дистанційних лабораторій.

1. *Вибір вагових коефіцієнтів та розрахунок інтегрального показника технології.* Пропонується для розрахунку інтегрального показника інформаційної технології дистанційних лабораторій, за яким буде здійснюватися порівняння, використовувати таку формулу, запропоновану авторами:

$$X = \sum_{i=1}^N k_i \cdot x_i, \quad (1)$$

де X – значення інтегрального показника інформаційної технології дистанційних лабораторій, чим більше значення, тим кращою є технологія;

x_i – оцінка i -го критерію порівняння за п'ятибальною шкалою з N загальних, де 1 – найнижча оцінка, 5 – найвища;

k_i – ваговий коефіцієнт i -го критерію порівняння в діапазоні від 0 до 1, з дотриманням умови, що сума всіх вагових коефіцієнтів дорівнює 1, тобто максимальне значення інтегрального показника для будь-яких комбінацій вагових коефіцієнтів становитиме 5:

$$\sum_{i=1}^N k_i = 1. \quad (2)$$

Очевидно, що вагові коефіцієнти, які мають значення більше ніж $1/N$, є більш важливими, ніж ті, які мають менше за середнє $(1/N)$ значення.

2. *Вибір найкращої технології дистанційних лабораторій.* На цьому етапі здійснюється порівняння отриманих значень інтегральних показників та вибір технології, для якої це значення буде максимальним.

Порівняльний аналіз інформаційних технологій дистанційних лабораторій. Для порівняння пропонується використати такі шість критеріїв $[x_1 \dots x_6]$ з відповідними ваговими коефіцієнтами $[k_1 \dots k_6]$:

1. *Рівень технологій, x_1 .* Цей критерій враховує те, наскільки використані мови програмування, системи керування базами даних тощо, є актуальними та підтримуються на час написання даної статті. Ваговий коефіцієнт $k_1 = 0,15$.

2. *Оновлення та підтримка, x_2 .* Даний критерій характеризує рівень оновлюваності і підтримки технології її розробниками. Ваговий коефіцієнт для цього критерію обрано

вище середнього – $k_2 = 0,2$, оскільки відсутність оновлень або закінчення розвитку технології може призвести до проблем з працездатністю дистанційної лабораторії, у випадку оновлень інших компонентів системи.

3. *Можливість інтеграції з LMS*, x_3 . Цей критерій відображає рівень підтримки інтеграції з LMS самою технологією, він є досить важливим ($k_3 = 0,2$), оскільки доступ до дистанційної лабораторії із середовища LMS суттєво спрощує оцінювання виконаної роботи викладачем та загалом підвищує якість освітнього процесу.

4. *Простота*, x_4 . Цей критерій враховує кількість «діючих осіб» в системі та рівень складності їх взаємодії один між одним. Ваговий коефіцієнт $k_4 = 0,1$, оскільки простота технології важлива лише на початку розробки, і не впливає на кінцевий функціонал дистанційної лабораторії.

5. *Швидкодія в real-time режимі*, x_5 . Цей критерій відображає те, наскільки архітектура системи добре підходить під real-time експерименти, і є найважливішим для нашого випадку ($k_5 = 0,25$), оскільки ми аналізуємо технології з погляду їх використання для розробки дистанційних лабораторій для спеціальностей електронного спрямування, де спостереження за формою сигналів та взаємодія в режимі реального часу є критично важливою.

6. *Простота конфігурації*, x_6 . Цей критерій характеризує рівень простоти налаштування системи дистанційної лабораторії з використанням обраної технології, ваговий коефіцієнт $k_6 = 0,1$, оскільки як і у випадку з 4 критерієм, він є важливим лише на початку розробки, і не впливає на кінцевий результат та якість розробленої лабораторії.

Варто відзначити, що наведені вагові коефіцієнти та критерії обиралися авторами з погляду їх застосування для порівняння технологій дистанційних лабораторій для спеціальностей електронного спрямування, у випадку фокуса на інші спеціальності, як вагові коефіцієнти, так і перелік критеріїв може бути іншим, для чого потрібно робити додаткове дослідження.

Виходячи з інформації, наведеної вище, було проаналізовано інформаційні технології дистанційних лабораторій за запропонованою методикою порівняння: встановлено значення показників критеріїв x_i за методом експертної оцінки, та порівняно отримані значення розрахованого інтегрального показника. Найбільш важливі пояснення для кожної технології наведені нижче.

WebLabDeusto використовує застарілу версію Python, через що рівень технологій оцінений в 3 ($x_1 = 3$). Також, дана система більше не підтримується, тому критерій «оновлення та підтримка» оцінено за мінімумом ($x_2 = 1$). Через необхідність вказування IP адрес у файлі з форматом YAML, що дещо ускладнює конфігурацію системи, критерій «простота конфігурації» оцінений в 4 бали ($x_6 = 4$). Всі інші критерії оцінені максимально.

На відміну від *WebLabDeusto*, технологія *LabDiscoveryEngine* використовує нову версію Python, підтримується і розвивається, але має такий самий підхід щодо конфігурації системи, тому вона має оцінку $x_6 = 4$ також, водночас, як всі інші критерії оцінені максимально.

VISIR Open Lab Platform 5.0 має складну систему інтеграцій, через що критерій «простота» оцінений як 2 ($x_4 = 4$). Крім цього, технології, застосовані у ній, є застарілими (Adobe Flash, PHP тощо), тому критерій «рівень технологій» $x_1 = 1$, а оновлення технології відсутні ($x_2 = 1$). Для конфігурації необхідне додаткове високовартісне обладнання виробництва компанії National Instruments, тому критерій «простота конфігурації» також оцінений мінімально ($x_6 = 1$).

Система *iLab* використовує застарілі технології ($x_1 = 1$), більше не підтримується ($x_2 = 1$), не має інтеграції з LMS (окрім підходів інтеграції «ззовні» власноруч, $x_3 = 1$), а також має забагато розподілених компонентів в системі, через що критерій «простота» був оцінений у 3 бали ($x_4 = 3$).

У системи *FREE* лабораторний сервер слугує як проксі, через який проходять всі запити до блоку контролю, що створює додаткову складність ($x_4=4$), а також негативно впливає на швидкодію в real-time режимі ($x_5=3$).

Результати порівняння відображені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця інформаційних технологій дистанційних лабораторій за запропонованою методологією порівняння

Технологія	Рівень технологій k_{x1}	Оновлення та підтримка k_{x2}	Можливість інтеграції з LMS k_{x3}	Простота k_{x4}	Швидкодія в real-time режимі k_{x5}	Простота конфігурації k_{x6}	Інтегральний показник X
WebLabDeusto	$0,15*3=0,45$	$0,2*1=0,2$	$0,2*5=1,0$	$0,1*5=0,5$	$0,25*5=1,25$	$0,1*4=0,4$	3,8
LabDiscovery Engine	$0,15*5=0,75$	$0,2*5=1,0$	$0,2*5=1,0$	$0,1*5=0,5$	$0,25*5=1,25$	$0,1*4=0,4$	4,9
VISIR 5.0	$0,15*1=0,15$	$0,2*1=0,2$	$0,2*5=1,0$	$0,1*2=0,2$	$0,25*5=1,25$	$0,1*1=1,0$	2,9
iLab	$0,15*1=0,15$	$0,2*1=0,2$	$0,2*1=0,2$	$0,1*3=0,3$	$0,25*5=1,25$	$0,1*3=0,3$	2,4
FREE	$0,15*5=0,75$	$0,2*5=1,0$	$0,2*5=1,0$	$0,1*4=0,4$	$0,25*3=0,75$	$0,1*5=0,5$	4,4

Джерело: розроблено авторами.

Результат аналізу. Як видно з результатів, наведених у таблиці 1, технології *iLab* та *VISIR* отримали найнижчий інтегральний показник, і не рекомендуються, у випадку розробки нових дистанційних лабораторій. Технологія *WebLabDeusto* в цілому має досить високий інтегральний показник, однак, її використання вже не доцільне, оскільки всі її переваги повторюються у новій технології *LabDiscoveryEngine*, яка також має й додаткові переваги. Технологія *FREE* має високий інтегральний показник, і може бути рекомендована у тому випадку, якщо вимога реального часу не є пріоритетною. Найвищий інтегральний показник має технологія *LabDiscoveryEngine*, яка увібрала в себе всі напрацювання за останні роки, й саме вона рекомендується як найкраща для нових розробок дистанційних лабораторій.

Висновки. Дистанційні лабораторії є важливим інструментом для забезпечення високої якості освітнього процесу та отримання практично-орієнтованих навичок здобувачами освіти, що особливо важливо в умовах військових дій, пандемій, для учасників освітнього процесу, які паралельно з освітою працюють тощо. Результати, наведені у дослідженнях за даною тематикою демонструють позитивний вплив використання дистанційних лабораторій на результати навчання студентів, включаючи підвищення успішності студентів та розвиток їхніх практичних навичок навіть у зазначених вище умовах.

Аналіз існуючих розробок дистанційних лабораторій показав, що однією з тенденцій у їх розвитку є перехід від окремих спроб до створення універсальних архітектур та фреймворків, які значно спрощують процес розробки та управління такими системами. Прикладами таких фреймворків є *WebLabDeusto*, *LabDiscovery Engine*, *VISIR 5.0*, *iLab* та *FREE*. Це сприяє масштабуванню дистанційних лабораторій та поширенню їх у різних освітніх установах, що, в свою чергу, підвищує доступність якісної технічної освіти. Такі архітектури та фреймворки мають за мету надання розробникам вже готових реалізацій тих модулів дистанційних лабораторій, що є спільними для більшості систем, наприклад авторизація та автентифікація. Також вони слугують для інтеграції цих систем з системами управління навчанням (LMS) та реалізації федерації (обміну ресурсів) дистанційних лабораторій, що покращує рівень освіти в цілому в країні та/або світі.

Оскільки кожна з технологій має свої особливості реалізації, переваги й недоліки, важливим є їх детальний аналіз з метою виділення найбільш перспективних, які є найбільш доцільними для використання у нових розробках. Задля цього було запропоновано методику порівняння систем дистанційних лабораторій за набором критеріїв з ваговими

коефіцієнтами, що дозволило якісно та кількісно порівняти найбільш розповсюджені станом на сьогодні технології, і як результат застосування методики, визначити *LabDiscoveryEngine* як технологію, яка є найкращою на сьогодні для застосування у дистанційних лабораторіях електронного спрямування. Ця технологія побудована на актуальній версії Python, надає розробникам API для побудови власних дистанційних лабораторій, має широкий перелік функцій керування користувачами, придатна для використання у лабораторіях реального часу.

Запропонована методика порівняння може бути адаптована для дистанційних лабораторій, які мають інший фокус (наприклад, хімія, фізика, механічна інженерія), шляхом додавання нових критеріїв та вагових коефіцієнтів, або ж застосована до нових технологій дистанційних лабораторій у випадку їх появи, що може бути реалізоване у подальших дослідженнях. Крім цього, все ще залишаються відкритими питання щодо довгострокових ефектів використання дистанційних лабораторій, їх економічної ефективності та стандартизації. Перспективним напрямком розвитку систем дистанційних лабораторій також є впровадження технологій розширеної реальності (XR) для підвищення рівня заглибленості та зацікавленості студентів. Ці аспекти також потребують подальшого детального опрацювання для повного розуміння потенціалу та обмежень таких систем, і можуть бути вирішені в подальших дослідженнях.

Таким чином, системи дистанційних лабораторій апаратного забезпечення є важливим інструментом для забезпечення якісної технічної освіти в сучасних умовах. Їх подальший розвиток та вдосконалення мають критичне значення для підготовки кваліфікованих фахівців у галузі технічних наук. Продовження досліджень та інвестицій у цю галузь є необхідним для забезпечення стійкого розвитку технічної освіти та підтримки інноваційного потенціалу країни в довгостроковій перспективі.

Список використаних джерел

1. Remote labs in higher engineering education: engaging students with active learning pedagogy / Van den Beemt, A., Groothuisen, S., Ozkan, L.[et al.] // *J Comput High Educ.* – 2023. – № 35. – Pp. 320-340. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12528-022-09331-4>
2. Virtual Laboratories for Education in Science, Technology, and Engineering: A Review / V. Potkonjak, M. Gardner, V. Callaghan, P. Mattila, C. Guetl, V. M. Petrovic, K. Jovanovic // *Computers & Education.* – 2016. – № 95. – Pp. 309-327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>.
3. Orduña, P. An Extensible Architecture for the Integration of Remote and Virtual Laboratories in Public Learning Tools / P. Orduña [et al.] // *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje.* – 2015. – Vol. 10, № 4. – Pp. 223-233. DOI: 10.1109/RITA.2015.
4. Zubía, J. G. Using remote labs in education: two little ducks in remote experimentation / J. G. Zubía, G. R. Alves. – Universidad de Deusto, 2012.
5. Balamuralithara, B. Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab / B. Balamuralithara, P. C. Woods // *Computer Applications in Engineering Education.* – 2009. – № 17(1). – Pp. 108-118. DOI: 10.1002/cae.20186.
6. Extended Remote Laboratories: A Systematic Review of the Literature From 2000 to 2022 / I. N. d. Silva, J. García-Zubía, U. Hernández-Jayo, J. B. D. M. Alves // *IEEE Access.* – 2023. – Vol. 11. – Pp. 94780-94804. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3271524.
7. Fearghal Morgan. Remote FPGA Lab for Enhancing Learning of Digital Systems / Fearghal Morgan, Seamus Cawley, David Newell // *ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst.* – 2012. – Vol. 5 (3). – Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1145/2362374.2362382>.
8. Impact of a remote lab on teaching practices and student learning / C. Viegas, A. Pavani, N. Lima, A. Marques, I. Pozzo, E. Dobboletta, V. Atencia, D. Barreto, F. Calliari, A. Fidalgo, D. Lima, G. Temporão, G. Alves // *Computers & Education.* – 2018. – № 126. – P. 201-216. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.07.012>.
9. Ma J. Hands-on, simulated, and remote laboratories / Jing Ma, Jeffrey V. Nickerson // *ACM Computing Surveys.* – 2006. – Vol. 38, № 3. – P. 7. DOI: <https://doi.org/10.1145/1132960.1132961>.

10. Orduña, P. An Extensible Architecture for the Integration of Remote and Virtual Laboratories in Public Learning Tools / P. Orduña [et al.] // IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje. – 2015. – Vol. 10, № 4. – P. 223-233. DOI: 10.1109/RITA.2015.
11. Orduña, P. Generic integration of remote laboratories in public learning tools: Organizational and technical challenges / P. Orduña [et al.] // 2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) Proceedings, Madrid, Spain, 2014. – Pp. 1-7. DOI: 10.1109/FIE.2014.7044025.
12. Lab Discovery Engine Website [Electronic resource] // Lab Discovery Engine Website. – Mode of access: <https://labdiscoveryengine.labsland.com>.
13. WebLab-Deusto - Front page [Electronic resource] // WebLab-Deusto - Front page. – Mode of access: <https://weblab.deusto.es/website/index.html>.
14. GitHub - weblabdeusto/weblabdeusto: Scalable, web-based and experiment-agnostic remote laboratory management system [Electronic resource] // GitHub. – Mode of access: <https://github.com/weblabdeusto/weblabdeusto>.
15. Labsland [Electronic resource] // Labsland. – Mode of access: <https://labsland.com/en>.
16. Labdiscoverylib - 0.6 – labdiscoverylib 0.6 documentation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://developers.labsland.com/labdiscoverylib/en/stable>.
17. The iLab Shared Architecture: A Web Services Infrastructure to Build Communities of Internet Accessible Laboratories [Electronic resource] / V. J. Harward [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2008. – Vol. 96, no. 6. – Pp. 931–950. DOI: <https://doi.org/10.1109/jproc.2008.921607>.
18. Sharing online laboratories and their components VA new learning experience / Jeppson K., Lundgren P., del Alamo J. A., Hardison J. L., Zych D. // Proc. 5th Eur. Workshop Microelectron. Educ., Lausanne, Switzerland, Apr. 15–16, 2004.
19. Development and Interaction between LMS Services and Remote Labs [Electronic resource] / Elio Sancristobal [et al.] // International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE). – 2008. – Vol. 4, № 3. – Pp. 35-41. DOI: <https://doi.org/10.3991/ijoe.v4i3.501>.
20. Sancristobal Ruiz, E. Integration view of Web Labs and Learning Management Systems / E. Sancristobal Ruiz, M. Castro, J. Harward, P. Baley, K. DeLong, J. Hardison // IEEE EDUCON 2010 Conference, IEEE, 2010. – Pp. 1409-1417. DOI: 10.1109/EDUCON.2010.5492363.
21. Developers - iLabs Dev - MIT Wiki Service [Electronic resource] // MIT Wiki Service. – Mode of access: <https://wikis.mit.edu/confluence/display/ILAB2/Developers>.
22. Using VISIR Remote Lab in the Classroom: Case of Study of the University of Deusto 2009 – 2019 [Electronic resource] / Javier Garcia-Zubia [et al.] // Cross Reality and Data Science in Engineering. – Cham, 2020. – Pp. 82–102. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0_7.
23. Use this laboratory in class – VISIR 2.0 documentation [Electronic resource] // Labsland. – Mode of access: https://labsland.com/pub/docs/experiments/electronics/en/use_this_laboratory.html#what-is-visir.
24. The remote laboratory VISIR - Introducing online laboratory equipment in electrical engineering classes [Electronic resource] / Dominik May [et al.] // 2020 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), Uppsala, 21–24 October 2020. – [S. l.], 2020. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/fie44824.2020.9274121>.
25. The VISIR Open Lab Platform 5.0-An architecture for a federation of remote laboratories / I. Gustavsson, G. Alves, R. Costa, K. Nilsson, J. Zackrisson, U. Hernandez-Jayo, J. Garcia-Zubia // In Proceedings of the Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV 2011) Congress, Brasov, Romania, 29 June – 2 July 2011.
26. Design and implementation of a Framework for remote experiments in education / Pavel Kuriscak [et al.] // 2022 8th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC), Panama, Panama, 19 - 21 October 2022. – [S. l.], 2022. – Pp. 258-265. DOI: <https://doi.org/10.1109/iestec54539.2022.00046>.
27. Why VISIR? Proliferative activities and collaborative work of VISIR system / Razwan Mohmed Salah Najimaldeen, Gustavo Ribeiro Alves, Dezheen Abdulazeez, Pedro Guerreiro, Ingvar Gustavsson // 7th annual International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN2015). – Pp. 3824-3835.

References

1. Van den Beemt, A., Groothuijsen, S., Ozkan, L. et al. (2023). Remote labs in higher engineering education: engaging students with active learning pedagogy. *J Comput High Educ*, 35, 320–340. <https://doi.org/10.1007/s12528-022-09331-4>.

2. Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrovic, V. M., & Jovanovic, K. (2016). Virtual Laboratories for Education in Science, Technology, and Engineering: A Review. *Computers & Education*, 95, 309-327. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.02.002>.
3. Orduña, P., et al. (2015). An Extensible Architecture for the Integration of Remote and Virtual Laboratories in Public Learning Tools. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, 10, 4, 223-233. doi: 10.1109/RITA.2015.
4. Zubía, J. G., and Alves, G. R. (Eds). (2012). *Using remote labs in education: two little ducks in remote experimentation*, 8. Universidad de Deusto.
5. Balamuralithara, B., & Woods, P. C. (2009). Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab. *Computer Applications in Engineering Education*, 17(1), 108-118. doi: 10.1002/cae.20186.
6. Silva, I. N. d., García-Zubía, J., Hernández-Jayo, U. and Alves, J. B. D. M. (2023). Extended Remote Laboratories: A Systematic Review of the Literature From 2000 to 2022. *IEEE Access*, 11, 94780-94804. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3271524.
7. Morgan, F., Cawley, S., and Newell, D. (2012). Remote FPGA Lab for Enhancing Learning of Digital Systems. *ACM Trans. Reconfigurable Technol. Syst.* 5, 3, Article 18 (October 2012). <https://doi.org/10.1145/2362374.2362382>.
8. Viegas, C., Pavani, A., Lima, N., Marques, A., Pozzo, I., Dobboletta, E., Atencia, V., Barreto, D., Calliari, F., Fidalgo, A., Lima, D., Temporão, G., & Alves, G. (2018). Impact of a remote lab on teaching practices and student learning. *Computers & Education*, 126, 201–216. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.07.012>.
9. Ma, J., and Nickerson, J. V. (2006). Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review. *ACM Comput. Surv.*, 38(3), 7–es. <https://doi.org/10.1145/1132960.1132961>.
10. Orduña P., et al. (2015). An Extensible Architecture for the Integration of Remote and Virtual Laboratories in Public Learning Tools. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, 10(4), 223-233. doi: 10.1109/RITA.2015.
11. Orduña, P. et al. (2014). Generic integration of remote laboratories in public learning tools: Organizational and technical challenges. *IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) Proceedings. Madrid, Spain*. (pp. 1-7). doi: 10.1109/FIE.2014.7044025.
12. Lab Discovery Engine Website. (n.d.). <https://labdiscoveryengine.labsland.com>.
13. WebLabDeusto (n.d.). <https://weblab.deusto.es/website/index.html>.
14. GitHub (n.d.). <https://github.com/weblabdeusto/weblabdeusto>.
15. LabsLand (n.d.). <https://labsland.com>.
16. LabDiscoveryLib (n.d.). <https://developers.labsland.com/labdiscoverylib/en/stable>.
17. Harward, V. J., et al. (2008). The iLab Shared Architecture: A Web Services Infrastructure to Build Communities of Internet Accessible Laboratories. *Proceedings of the IEEE*, 96, 6, 931-950. doi: 10.1109/JPROC.2008.921607
18. Jeppson, K., Lundgren, P., del Alamo, J. A., Hardison, J. L., and Zych, D. (2004). Sharing online laboratories and their components VA new learning experience. Proc. 5th Eur. Workshop Microelectron. Educ., Lausanne, Switzerland, Apr. (pp. 15–16).
19. Sancristóbal, E., et al. (2008). Development and interaction between LMS services and remote labs. *Int. J. Online Eng.*, 4(3), 35–41.
20. Sancristobal Ruiz, E., Castro, M., Harward, J., Baley, P., DeLong, K., and Hardison, J. (2010). Integration view of Web Labs and Learning Management Systems. *IEEE EDUCON 2010 Conference, IEEE*. (pp. 1409–1417). doi: 10.1109/EDUCON.2010.5492363.
21. The iLab Shared Architecture (n.d.). <https://wikis.mit.edu/confluence/display/ILAB2/Developers>.
22. Garcia-Zubia, J. et al. (2021). Using VISIR Remote Lab in the Classroom: Case of Study of the University of Deusto 2009–2019. Auer, M., May, D. (eds.). *Cross Reality and Data Science in Engineering. REV 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1231. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52575-0_7.
23. What is VISIR? (n.d.). https://labsland.com/pub/docs/experiments/electronics/en/use_this_laboratory.html#what-is-visir.

24. May, D., Reeves, B., Trudgen, M. and Alweshah, A. (2020). The remote laboratory VISIR - Introducing online laboratory equipment in electrical engineering classes". *2020 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*. Uppsala, Sweden. (pp. 1-9). doi: 10.1109/FIE44824.2020.9274121.

25. Razwan Mohmed, Salah Najimaldeen, Gustavo Ribeiro Alves, Dezhveen Abdulazeez, Pedro Guerreiro, Ingvar Gustavsson. (2015). Why VISIR? Proliferative activities and collaborative work of VISIR system," 7th annual International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN2015) (pp. 3824 – 3835).

26. Gustavsson, I., Alves, G., Costa, R., Nilsson, K., Zackrisson, J., Hernandez-Jayo, U., Garcia-Zubia, J. (2011). The VISIR Open Lab Platform 5.0—An architecture for a federation of remote laboratories. In *Proceedings of the Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV 2011)*. Congress, Brasov, Romania, 29 June–2 July 2011.

27. Kuris`c`ak, P., et al. (2022). Design and implementation of a framework for remote experiments in education. *8th Intl. Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)* (pp. 258–265).

Отримано 02.12.2024

UDC 004.771

Vladyslav Baida¹, Oleksandr Velihorskyi²

¹PhD Student of the Department of Informational 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>

²Head of the Department of Radio Engineering and Embedded Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: o.veligorskiy@stu.cn.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8256-7339>

Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ>

METHODOLOGY FOR COMPARISON OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR DEVELOPMENT OF REMOTE HARDWARE LABORATORIES

The rapid development of information technologies and global challenges of recent years have significantly altered approaches to organizing educational processes, especially in technical sciences. The need for remote hardware laboratories has become particularly acute in Ukraine due to the ongoing military conflict, where many students and teachers are forced to work and study remotely. This research addresses the critical need for effective remote laboratory systems that can provide quality technical education regardless of physical location.

The study focuses on analyzing and comparing modern remote hardware laboratory systems, proposing a methodology for their evaluation, and determining the most optimal solution for implementation. The problem lies in the traditional methods of hardware study requiring physical access to equipment, which becomes impossible in remote learning conditions. This creates a significant gap between the theoretical knowledge and practical skills of students.

The research proposed a new methodology that involves a systematic analysis of existing remote laboratory systems based on six key criteria: technology level, updates and support, Learning Management System (LMS) integration capabilities, simplicity, real-time performance, and ease of configuration. The study examines several major systems, including WebLab-Deusto, LabDiscoveryEngine, VISIR, iLab, and FREE, analyzing their architectures, advantages, and limitations.

Through comparative analysis, the research revealed that LabDiscoveryEngine demonstrates the highest overall effectiveness among the examined systems, scoring 29 out of 30 possible points across all evaluation criteria. The study identified key architectural approaches used in existing systems and analyzed their respective strengths and weaknesses. Special attention was paid to aspects such as the user interface, managing access to limited hardware resources, and security mechanisms.

The results of the study allow the use of the new proposed methodology for comparing remote laboratory systems and improve the overall understanding of the development and implementation of remote laboratory systems, providing valuable information for universities seeking to implement or improve their remote laboratory capabilities.

The article emphasizes the critical importance of remote laboratory systems for ensuring quality technical education in modern conditions and outlines future research directions, including the investigation of long-term effects, economic efficiency, and standardization of remote laboratory systems. The research results can be practically applied in selecting key technologies for creating new remote laboratories and improving existing ones.

Keywords: remote laboratories; hardware; software architecture; distributed systems; distance learning.

Fig.: 6. Table.: 1. References: 27.

Денис Вікторович Кузьменко

аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: deniskuzmenko961@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0314-568X>

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ЕМУЛЯЦІЇ НЕГАТИВНИХ ВПЛИВІВ
НА РЕСУРСИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ**

Представлена у статті інформація має оглядовий характер. У статті розглянуто сучасні методи та моделі емуляції негативних впливів на ресурси інформаційних систем з метою підвищення їхньої стійкості та безпеки. Проаналізовано методи емуляції DoS/DDoS атак, включаючи моделі Пуассона, фрактальні та епідеміологічні моделі ботнетів. Розглянуто ін'єкцію вразливостей та хаос-інжиніринг як інструменти для тестування надійності та відмовостійкості систем. Підкреслено важливість використання математичних моделей і методів, таких як процеси Маркова та Монте-Карло симуляції, для точного відтворення реальних загроз. Зроблено висновки про необхідність інтегрованих підходів та впровадження штучного інтелекту для підвищення рівня кібербезпеки.

Ключові слова: емуляція негативних впливів; інформаційні системи; DoS/DDoS атаки; модель Пуассона; фрактальні моделі; епідеміологічні моделі; ін'єкція вразливостей; хаос-інжиніринг; машинне навчання; штучний інтелект; кібербезпека; моделювання ботнетів; Монте-Карло симуляції; теорія ігор; відмовостійкість системи.

Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. У сучасному цифровому світі інформаційні системи стали фундаментальною основою для функціонування бізнесу, державного управління та повсякденного життя громадян. Зі зростанням обсягів даних та підвищенням складності технологічних рішень збільшується і вразливість цих систем до негативних впливів. Кібератаки, такі як DoS/DDoS, відмови апаратного та програмного забезпечення, людські помилки та природні катастрофи можуть призвести до серйозних збоїв у роботі інформаційних систем, що у свою чергу спричиняє значні фінансові втрати, компрометацію конфіденційних даних та підрив довіри клієнтів. Загрози кібербезпеки постійно еволюціонують, стаючи більш складними та витонченими. Зловмисники активно використовують нові методи та інструменти для обходу традиційних засобів захисту. У цьому контексті дослідження методів та моделей емуляції негативних впливів набуває особливої актуальності. Воно дозволяє імітувати потенційні загрози та оцінювати стійкість інформаційних систем до реальних атак і відмов, що є критично важливим для їхнього вдосконалення та розвитку ефективних стратегій захисту. Емуляція негативних впливів є ключовим інструментом для проактивного виявлення вразливостей та тестування реакції систем на різні сценарії негативних подій. Це сприяє не лише підвищенню рівня безпеки, але й забезпеченню безперервності бізнес-процесів, що є особливо важливим у сферах з високими вимогами до надійності, таких як фінансовий сектор, енергетика, охорона здоров'я та транспорт. Крім того, розвиток методів емуляції негативних впливів підтримує тенденції впровадження передових технологій, таких як штучний інтелект та машинне навчання, для покращення засобів кібербезпеки. Це відкриває нові можливості для створення адаптивних систем захисту, які можуть самостійно виявляти та нейтралізувати загрози в режимі реального часу. Отже, тема дослідження є надзвичайно актуальною в умовах сучасних кіберзагроз та швидкого розвитку інформаційних технологій. Вона має значний науковий та практичний інтерес, сприяючи підвищенню стійкості інформаційних систем та захисту критичної інфраструктури від негативних впливів. Методи та моделі емуляції негативних впливів є критично важливими для тестування та вдосконалення інформаційних систем. Вони дозволяють дослідникам і практикам імітувати різні сценарії відмов та атак, оцінювати стійкість системи та розробляти стратегії захисту. Застосування таких методів сприяє підвищенню рівня безпеки, забезпеченню безперервності бізнес-процесів та зменшенню потенційних фінансових втрат.

Постановка проблеми. Інформаційні системи сьогодні піддаються різноманітним негативним впливам, включаючи кібератаки, відмови апаратного та програмного забезпечення, людські помилки та природні катастрофи, що загрожують їхній безпеці та стійкості. Виникає потреба в розробці ефективних методів та моделей для емуляції цих впливів з метою аналізу, виявлення вразливостей та розробки стратегій захисту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі, спостерігається значний прогрес у дослідженнях методів та моделей емуляції негативних впливів на інформаційні системи. Сучасні роботи зосереджені на кількох ключових напрямках. Використання штучного інтелекту та машинного навчання для моделювання та виявлення DoS/DDoS атак. Робота ведеться над застосуванням глибоких нейронних мереж [10] для детекції DDoS атак у реальному часі, що підвищує ефективність захисних механізмів. По-друге, розвиток хаос-інжинірингу як методології для тестування стійкості розподілених систем [11]. Також деякі роботи зосереджені на удосконаленні епідеміологічних моделей для моделювання поширення шкідливого ПЗ [12].

Метою статті є короткий аналіз сучасних методів і моделей емуляції негативних впливів на інформаційні системи. Стаття спрямована на виявлення ефективних підходів для моделювання загроз та розробку стратегій підвищення безпеки й надійності систем.

Виклад основного матеріалу. Атаки відмови в обслуговуванні (*Denial of Service, DoS*) та розподілені атаки відмови в обслуговуванні (*Distributed Denial of Service, DDoS*) є одними з найбільш поширених та небезпечних загроз для інформаційних систем. Вони спрямовані на вичерпання ресурсів системи, роблячи її недоступною для користувачів. Емуляція таких атак є важливим інструментом для оцінки стійкості та безпеки системи, а також для розробки ефективних механізмів захисту. Атаки DoS/DDoS базуються на ідеї перевантаження ресурсів цільової системи, що може включати процесорний час, пам'ять, пропускну здатність мережі або інші критичні ресурси. У розподілених DDoS атаках використовується велика кількість скомпрометованих пристроїв (так званих «ботів») для одночасного надсилання запитів до цілі, що ускладнює їх виявлення та блокування. Емуляція DoS/DDoS атак полягає в моделюванні умов, що відповідають реальним атакам, з метою оцінки реакції системи та її здатності протистояти таким загрозам. Це дозволяє виявити вразливості в архітектурі системи, конфігурації мережі та налаштуваннях безпеки. Розглянемо основні методи емуляції DoS/DDoS атак:

1. Генерація трафіку високої інтенсивності: Створення великої кількості запитів до системи для перевірки її здатності обробляти навантаження. Це може бути досягнуто за допомогою спеціалізованих інструментів, що генерують трафік певного типу.

2. Симуляція різних типів атак: Емуляція специфічних протоколів або вразливостей, наприклад, атаки на рівні мережевих протоколів (SYN flood, UDP flood) або на рівні додатків (HTTP flood).

3. Використання розподілених інструментів: Моделювання DDoS-атак шляхом одночасного запуску трафіку з декількох джерел або за допомогою віртуалізації для імітації великої кількості атакуючих вузлів.

Далі опишемо основні моделі для емуляції трафіку DoS/DDoS атак. Модель Пуассона широко використовується для моделювання випадкових подій у часі, включаючи мережевий трафік. У контексті DoS/DDoS атак, процес Пуассона може моделювати кількість пакетів або запитів, що надходять до сервера за певний інтервал часу. Нехай $N(t)$ – число подій (прибуття пакетів) до моменту часу t . Процес Пуассона з параметром λ має такі властивості:

$$P(N(t)=k) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}. \quad (1)$$

Інтервали між подіями є незалежними та експоненційно розподіленими з параметром λ :

$$f_T(t) = \lambda e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

У простих моделях DoS атак припускається, що атакуючі генерують пакети з постійною середньою інтенсивністю λ . Це дозволяє оцінити навантаження на систему та аналізувати її стійкість до атак з відомою інтенсивністю. Реальний трафік DoS/DDoS атак може бути більш непередбачуваним та самоподібним, що не повністю описується процесом Пуассона [1].

Провівши обчислення та порівнявши реальний мережевий трафік (з датасету CIC-IDS2017) та, згенерований за пуассонівською моделлю з тим самим середнім λ . Дисперсія в реальних даних набагато більша (≈ 400) проти 24.2 у класичного пуассонівського розподілу. Пуассонівська модель не відображає кореляцій реального трафіку, бо реальна дисперсія та автокореляція значно вищі. Це свідчить про необхідність складніших моделей.

Фрактальні та самоподібні моделі трафіку.

Фрактальні моделі враховують довгострокову залежність та самоподібність мережевого трафіку. Інтернет-трафік часто має властивість самоподібності, що характеризується важкими хвостами в розподілах та довгостроковою залежністю. Фрактальні моделі можна представити за допомогою автокореляційної функції з повільним спаданням:

$$R(k) \sim k^{-\beta}, \quad 0 < \beta < 1 \quad (3)$$

Херстовий показник (Hurst parameter) H :

$$H = 1 - \frac{\beta}{2}, \quad (4)$$

де $H \in (0, 5, 1)$ для самоподібних процесів.

Самоподібні моделі дозволяють більш точно описати характер трафіку під час DDoS атак, враховуючи його нерівномірність. [2]

Дисперсія фрактальної моделі (≈ 320) вища, ніж у Пуассона, і ближча до реальних даних CIC-IDS2017 (≈ 400), отже краще відображає непостійність трафіку. Автокореляційна функція у фрактальному трафіку повільно спадає ($0,42 \rightarrow 0,30 \rightarrow 0,25$ при $\text{lag} = 1, 5, 10$), що більше схоже на реальні дані ($0,37 \rightarrow 0,19 \rightarrow 0,10$), тоді як у чистому Пуассоні кореляція майже нульова.

Моделі ботнетів на основі епідеміологічних моделей.

Епідеміологічні моделі, такі як SIR (Susceptible-Infectious-Recovered), використовуються для моделювання поширення ботнетів у мережі. Модель дозволяє оцінити розмір ботнету $I(t)$ у часі, що визначає потенційну потужність DDoS атаки.

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)I(t); \quad (5)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t); \quad (6)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t), \quad (7)$$

де $S(t)$ – кількість вразливих вузлів у момент часу t , $I(t)$ – кількість інфікованих вузлів (ботів), $R(t)$ – кількість відновлених або захищених вузлів, β – швидкість інфікування, γ – швидкість відновлення [3].

У контексті ботнетів важливо розглянути методи симуляція вірусів та шкідливого ПЗ оскільки це є важливим аспектом дослідження кібербезпеки, що дозволяє вивчати поведінку зловмисного програмного забезпечення без ризику заподіяння реальної шкоди. Метою симуляції є розуміння механізмів поширення, інфікування та впливу шкідливого ПЗ на інформаційні системи, а також розробка ефективних методів виявлення та захисту.

Вищеописана епідеміологічна модель, як SIR (Susceptible-Infectious-Recovered) та її варіації, широко використовуються для моделювання поширення вірусів та шкідливого ПЗ у комп'ютерних мережах. Ці моделі описують динаміку інфікування вузлів мережі та

їх відновлення [8]. Також необхідно згадати про методи машинного навчання та штучного інтелекту які можуть застосовуватися для моделювання поведінки шкідливого ПЗ та розробки систем його виявлення на основі аналізу великих обсягів даних. Здебільшого методи машинного навчання застосовуються для автоматичного виявлення шкідливого ПЗ на основі поведінкових та статичних ознак, моделювання еволюції шкідливого ПЗ, що адаптується до засобів захисту та розробка активних систем безпеки, які можуть передбачати нові загрози [9; 10].

Також варто згадати застосування теорія ігор для моделювання взаємодії між атакуючим та захисником як стратегічної гри, де обидві сторони прагнуть оптимізувати свої дії. Визначення оптимальних стратегій для обох сторін, де жоден з гравців не може покращити свій вигравш, змінюючи стратегію односторонньо. Модель дозволяє аналізувати оптимальні стратегії захисту та атаки, враховуючи можливі дії супротивника, та допомагає ухвалювати рішення щодо інвестицій у безпеку [4].

Та моделювання атак на рівні додатків за допомогою теорії керованих автомата. Такий підхід використовує теорію керованих автоматів для моделювання поведінки системи під час атак на рівні додатків, таких як HTTP-флуд атаки. Дозволяє аналізувати, як послідовність зловмисних запитів може перевести систему в перевантажений або відмовний стан [5].

Ін'єкція вразливості (Fault Injection).

Ін'єкція вразливості є методологією тестування та верифікації, що полягає в навмисному введенні помилок або відмов у систему з метою оцінки її надійності, стійкості та здатності до відновлення. Цей підхід дозволяє імітувати негативні впливи на ресурси інформаційних систем і є критичним для виявлення вразливостей та забезпечення безперебійної роботи системи в умовах реальних відмов. Ін'єкція вразливості базується на принципах теорії надійності та відмовостійкості систем. Відповідно до моделі відмов система може піддаватися різним видам помилок: апаратним, програмним або викликаним зовнішніми факторами. Метод ін'єкції вразливості дозволяє дослідити реакцію системи на такі помилки та оцінити її здатність до коректного функціонування або відновлення після відмов. Виділяють такі типи методів:

1. Апаратна ін'єкція вразливості: використовує фізичні засоби для створення відмов апаратних компонентів, наприклад, введення електричних перешкод, радіаційного випромінювання або зміни параметрів живлення.

2. Програмна ін'єкція вразливості: введення помилок на рівні програмного забезпечення шляхом модифікації коду, змінних, виклику помилкових функцій або використання спеціалізованих інструментів для ін'єкції помилок у процес виконання програми.

3. Ін'єкція вразливості на рівні даних: маніпуляція даними, що передаються між компонентами системи, з метою перевірки стійкості до корупції даних, неочікуваних або некоректних значень.

4. Мережева ін'єкція вразливості: емуляція мережевих відмов, таких як затримки, втрата пакетів, порушення з'єднань, для оцінки стійкості системи до нестабільності мережі.

Застосування ін'єкції вразливості.

1. Верифікація систем безпеки: оцінка здатності системи протистояти атакам або несправностям, що можуть бути викликані зловмисниками або непередбаченими подіями.

2. Тестування розподілених систем: перевірка стійкості кластерних, хмарних сервісів та мікросервісних архітектур до відмов окремих компонентів або вузлів.

3. Розробка відмовостійких систем: виявлення слабких місць та вдосконалення механізмів відновлення, резервування та масштабування.

Для моделювання надійності систем із відмовами та відновленням також використовують Марковські процеси. Марковські моделі описують різні стани системи та ймовірності переходів між ними, що виникають через введення помилок і процеси відновлення,

дозволяючи оцінити вплив помилок на ймовірність безвідмовної роботи системи та визначити оптимальні параметри відновлення для мінімізації часу простою. І аналогічно до попереднього процес Пуассона застосовується для моделювання випадкових подій у часі, таких як введення помилок або відмов компонентів, з певною середньою інтенсивністю. Це дозволяє планувати експерименти фолт інжекції, визначати частоту та кількість помилок, а також аналізувати вплив інтенсивності введення помилок на загальну надійність системи [6].

Хаос-інжиніринг (Chaos Engineering).

Хаос-інжиніринг є сучасною методологією випробування розподілених комп'ютерних систем, що полягає у навмисному введенні несправностей та відмов з метою оцінки їхньої стійкості та надійності в умовах непередбачуваних подій. Цей підхід дозволяє моделювати негативні впливи на ресурси інформаційних систем, сприяючи виявленню прихованих вразливостей та підвищенню здатності системи витримувати збої. Теоретичні основи хаос-інжинірингу базуються на принципах теорії складних систем та стохастичних процесів. Сучасні розподілені системи характеризуються високою складністю та динамічністю, що призводить до виникнення непередбачуваних взаємодій між компонентами. Це може спричинити відмови, які важко передбачити та запобігти традиційними методами тестування. Хаос-інжиніринг дозволяє досліджувати поведінку таких систем, моделюючи реальні умови експлуатації та потенційні несправності. Основний принцип хаос-інжинірингу полягає у проведенні експериментів, що навмисно вводять зміни або відмови в систему, для перевірки її здатності підтримувати нормальну роботу. Процес починається з визначення нормального стану системи шляхом встановлення базових метрик стабільності та продуктивності. Після цього формулюються гіпотези щодо очікуваної поведінки системи при введенні несправностей. Проведення експериментів дозволяє перевірити ці гіпотези, а аналіз результатів дає змогу порівняти фактичну поведінку з очікуваною та виявити можливі розбіжності.

Методологія хаос-інжинірингу передбачає використання різних підходів для моделювання несправностей. Це може включати відключення окремих сервісів або вузлів для оцінки здатності системи продовжувати роботу без них; введення мережевих несправностей, таких як затримки, втрата пакетів чи розриви з'єднань, для перевірки стійкості мережевих взаємодій; зміну ресурсів системи, наприклад, зменшення доступної пам'яті чи процесорної потужності, для оцінки поведінки в умовах обмежень; а також моделювання атак на рівні безпеки з метою перевірки ефективності захисних механізмів.

Застосування хаос-інжинірингу є особливо актуальним у великих розподілених системах, таких як хмарні платформи, мікросервісні архітектури та системи контейнеризації. Цей підхід дозволяє підвищити надійність та доступність системи, виявити та усунути слабкі місця, що можуть призвести до відмов, покращити реакцію на інциденти шляхом розробки та відпрацювання процедур реагування на збої, а також оптимізувати архітектуру системи для підвищення її стійкості до несприятливих умов.

Використання Монте-Карло симуляцій для хаос-інжинірингу.

Використання методу Монте-Карло в хаос-інжинірингу дозволяє моделювати складні системи та процеси шляхом багаторазового випадкового вибору значень змінних і аналізу отриманих результатів. Цей чисельний підхід є особливо корисним для моделювання та аналізу систем, які мають випадкову або стохастичну природу, що характерно для хаотичних експериментів у інформаційних системах. У контексті хаос-інжинірингу метод Монте-Карло допомагає моделювати вплив випадкових несправностей та відмов на інформаційні системи, що дозволяє оцінити стійкість системи, ймовірність відмов та інші статистичні характеристики в умовах хаотичних експериментів. Математично цей метод включає визначення випадкових змінних та їх розподілів, таких як час до відмови

компонентів або час відновлення після відмови. Для кожної симуляції генеруються випадкові значення цих змінних відповідно до заданих розподілів, використовуючи генератори випадкових чисел та статистичні методи для забезпечення достовірності моделювання. Поведінка системи з введеними несправностями моделюється шляхом симуляції подій відмов та відновлення, відстежуючи стан кожного компонента у часі, враховуючи взаємозв'язок між компонентами та можливі каскадні відмови. Стан системи оновлюється відповідно до подій і після відновлення компонента система може повертатися до нормального функціонування або залишатися в деградованому стані залежно від структури системи. Процес симуляції повторюється багаторазово для отримання статистично значущих результатів, збираючи дані про часи відмов, відновлення, тривалість простою системи та інші показники для подальшого аналізу. Застосування методу Монте-Карло в хаос-інжинірингу дозволяє оцінити ймовірності відмов та інші статистичні характеристики системи під час хаотичних експериментів, моделюючи складні сценарії, які важко описати аналітичними моделями [7].

Висновки. У статті було розглянуто основні методи та моделі для емуляції негативних впливів на ресурси інформаційних систем. Зокрема, акцентовано увагу на емуляції DoS/DDoS атак, ін'єкції вразливостей та хаос-інжинірингу. Використання математичних моделей, таких як процеси Пуассона, фрактальні моделі, епідеміологічні моделі та методи Монте-Карло, дозволяє формалізувати та точно відтворити умови, що відповідають реальним загрозам. Емуляція DoS/DDoS атак за допомогою моделей трафіку та ботнетів сприяє виявленню вразливостей у мережевій інфраструктурі та розробці ефективних механізмів захисту. Ін'єкція вразливостей дозволяє протестувати стійкість систем до внутрішніх відмов, забезпечуючи підвищення надійності та безвідмовності. Хаос-інжиніринг, застосовуючи методи стохастичного моделювання та симуляцій, допомагає виявити приховані проблеми в розподілених системах та підготувати їх до непередбачуваних подій. Застосування цих методів має велике практичне значення. Воно дозволяє не лише підвищити стійкість та безпеку інформаційних систем, але й забезпечити безперервність бізнес-процесів, мінімізувати фінансові втрати та зберегти репутацію організацій. Крім того, такі підходи сприяють вдосконаленню процесів розробки та експлуатації систем, роблячи їх більш адаптивними до сучасних викликів кібербезпеки. У майбутніх дослідженнях варто приділити увагу розвитку інтегрованих підходів, що поєднують різні методи емуляції та моделювання для більш комплексного аналізу систем. Також перспективним є використання технологій штучного інтелекту та машинного навчання для автоматизації процесів виявлення вразливостей та адаптивної реакції на загрози. Таким чином, методи та моделі емуляції негативних впливів є невід'ємною складовою сучасної практики забезпечення безпеки та надійності інформаційних систем. Вони надають можливість проактивно реагувати на потенційні загрози, підвищуючи стійкість систем та захищаючи критичні ресурси в умовах постійно розвитку кіберзагроз.

Список використаних джерел

1. Dovrolis, C. What do packet dispersion techniques measure? [Electronic resource] / C. Dovrolis, P. Ramanathan, D. Moore. – Accessed mode: <https://www.researchgate.net/publication/3893862>.
2. On the self-similar nature of Ethernet traffic [Electronic resource] / W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger, D. Wilson. – Access mode: <https://dl.acm.org/doi/10.1109/90.282603>.
3. Zou, C. C. Worm propagation modeling and analysis under dynamic quarantine defense [Electronic resource] / C. C. Zou, W. Gong, D. Towsley. – Accessed mode: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/948187.948197>.
4. Alpcan, T. A game theoretic approach to decision and analysis in network intrusion detection [Electronic resource] / T. Alpcan, T. Başar. – Accessed mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1273013>.

5. Bhuyan, M. H. An empirical evaluation of information metrics for low-rate and high-rate DDoS attack detection [Electronic resource] / M. H. Bhuyan, D. K. Bhattacharyya, J. K. Kalita. – Accessed mode: <https://www.researchgate.net/publication/264810679>.
6. Lala, J. H. Architectural principles for safety-critical real-time applications [Electronic resource] / J. H. Lala, R. E. Harper. – Accessed mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/259424>.
7. Rubinstein, R. Y. Simulation and the Monte Carlo Method [Electronic resource] / R. Y. Rubinstein, D. P. Kroese. – Accessed mode: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118631980>.
8. The monitoring and early detection of Internet worms [Electronic resource] / C. C. Zou, D. Towsley, W. Gong, L. Gao. – Accessed mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1528487>.
9. Saxe, J. Deep neural network based malware detection using two dimensional binary program features [Electronic resource] / J. Saxe, K. Berlin. – Accessed mode: <https://arxiv.org/abs/1508.03096>.
10. Hamarshe, A. Detection of DDoS Attacks in Software Defined Networking Using Machine Learning Models [Electronic resource] / A. Hamarshe, H. I. Ashqar, M. N. Hamarsheh. – Accessed mode: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8985747>.
11. Yadav, R. Harnessing Chaos: The Role of Chaos Engineering in Cloud Applications and Impacts on Site Reliability Engineering [Electronic resource] / R. Yadav. – Accessed mode: <https://www.researchgate.net/publication/381479001>
12. Modeling Self-Propagating Malware with Epidemiological Models [Electronic resource] / A. Chernikova, N. Gozzi, S. Boboila, N. Perra, T. Eliassi-Rad, A. Oprea. – Accessed mode: <https://arxiv.org/abs/2208.03276>.

References

1. Dovrolis, C., Ramanathan, P., Moore, D. (2001). What do packet dispersion techniques measure? *Proceedings of IEEE INFOCOM* (vol. 2, pp. 905-914). <https://www.researchgate.net/publication/3893862>.
2. Leland, W., Taqqu, M., Willinger, W., Wilson, D. (1994). On the self-similar nature of Ethernet traffic. *IEEE/ACM Transactions on Networking* (TON), 2(1), 1-15. <https://dl.acm.org/doi/10.1109/90.282603>.
3. Zou, C. C., Gong, W., Towsley, D. (2023). Worm propagation modeling and analysis under dynamic quarantine defense. *WORM '03: Proceedings of the 2003 ACM workshop on Rapid malware* (pp. 51-60). <https://dl.acm.org/doi/10.1145/948187.948197>.
4. Alpcan, T., Başar, T. (2004). A game theoretic approach to decision and analysis in network intrusion detection. 42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No.03CH37475). <https://ieeexplore.ieee.org/document/1273013>.
5. Bhuyan, M. H., Bhattacharyya, D. K., Kalita, J. K. (2014). An empirical evaluation of information metrics for low-rate and high-rate DDoS attack detection. *Pattern Recognition Letters*. <https://www.researchgate.net/publication/264810679>.
6. Lala, J. H., Harper, R. E. Architectural principles for safety-critical real-time applications. *Proceedings of IEEE INFOCOM* (Vol. 82(1)). (pp. 25-40). <https://ieeexplore.ieee.org/document/259424>.
7. Rubinstein, R. Y., Kroese, D. P. (2016). Simulation and the Monte Carlo Method. Book Series: Wiley Series in Probability and Statistics. John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118631980>.
8. Zou, C. C., Towsley, D., Gong, W., Gao, L. (2005). The monitoring and early detection of Internet worms. *IEEE/ACM Transactions on Networking* (Vol. 13(5)). <https://ieeexplore.ieee.org/document/1528487>.
9. Saxe, J., Berlin, K. (2015). Deep neural network based malware detection using two dimensional binary program features. *Cornell University*. <https://arxiv.org/abs/1508.03096>
10. Hamarshe, A., Ashqar, H. I., Hamarsheh, M. N. (2023). Detection of DDoS Attacks in Software Defined Networking Using Machine Learning Models. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/369198910_Detection_of_DDoS_Attacks_in_Software_Defined_Networking_Using_Machine_Learning_Models.
11. Yadav, R. Harnessing Chaos: The Role of Chaos Engineering in Cloud Applications and Impacts on Site Reliability Engineering. *International Journal of Computer Trends and Technology*, 72(6), 25-30. <https://www.researchgate.net/publication/381479001>.
12. Chernikova, A., Gozzi, N., Boboila, S., Perra, N., Eliassi-Rad, T., Oprea, A. (2022). Modeling Self-Propagating Malware with Epidemiological Models. *Cornell University*. <https://arxiv.org/abs/2208.03276>.

Denis Kuzmenko

PhD Student of Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: deniskuzmenko961@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0009-0314-568X>

METHODS AND MODELS FOR EMULATING NEGATIVE IMPACTS ON INFORMATION SYSTEM RESOURCES

Modern information systems and existing protection methods often cannot keep up with the rapid evolution of threats, and traditional approaches to security testing do not always allow for the identification of all potential vulnerabilities. Methods of emulating negative impacts on information system resources are in a stage of active development and are used in various fields, but they require further improvement and systematization. The aim of the article is to uncover and analyze modern methods and models of emulating negative impacts in a broader context, as well as to determine their advantages, limitations, and areas of application. The study examines the emulation of DoS/DDoS attacks using traffic models, such as the Poisson model and fractal models, as well as modeling botnets based on epidemiological models. Methods of fault injection and chaos engineering, along with machine learning and artificial intelligence techniques, have been investigated as tools for testing system reliability and fault tolerance. The conclusion of this study is that the application of mathematical models such as Poisson processes, fractal models, epidemiological models, and Monte Carlo methods allows for more accurate modeling of negative impacts and assessment of system resilience to various types of attacks and failures. A comprehensive approach to emulating negative impacts, which combines different methods and models, is necessary for enhancing cybersecurity levels. This approach allows not only for the detection of existing vulnerabilities, but also for proactive responses to potential threats. The detection and neutralization of these attacks is a complex task that requires a comprehensive approach integrating various modeling, analysis, and counteraction methods.

Keywords: emulation of negative impacts; information systems; DoS/DDoS attacks; Poisson model; fractal models; epidemiological models; fault injection; chaos engineering; machine learning; artificial intelligence; cybersecurity; botnet modeling; Monte Carlo simulations; game theory; system fault tolerance.

References: 12.

Кирило Олегович Насенок¹, Марія Михайлівна Войцеховська²

¹аспірант, здобувач наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 122
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: kaboo@stu.cn.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0972-7086>

²доктор філософії, доцент кафедри інформаційних технологій і програмної інженерії
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: m.voitsekhovska@stu.cn.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1711-101X>

**ПРОБЛЕМАТИКА КЛІЄНТСЬКОГО РЕНДЕРИНГУ
В СУЧАСНІЙ ВСЕСВІТНІЙ МЕРЕЖІ**

Стаття надає огляд сучасних проблем клієнтського рендерингу та їхній вплив на всесвітню мережу. Описані та згруповані основні проблеми, які з'являються при використанні клієнтського рендерингу. Зокрема, описано вплив клієнтського рендерингу на час завантаження та розмір вебсторінок, проблеми з пошуком через пошукові системи, а також вразливості, які існують у безпеці додатків із клієнтським рендерингом. Стаття включає аналіз можливостей вирішення цих проблем та оптимізації роботи всесвітньої павутини

Ключові слова: клієнтський рендеринг; вебдодаток; клієнтський додаток; оптимізація; всесвітня мережа; безпека; пошукова система.

Рис.: 2. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Клієнтський рендеринг — це один із методів реалізації рендерингу клієнтських додатків, зокрема вебсторінок, які переглядаються у браузері. У 2013 році, коли цей підхід здобував популярність, він став революційним для розробників і всієї вебіндустрії, оскільки дозволяв створювати логічний та компонентний код, який легко розширюється і повторно використовується. На 2024 рік приблизно 9,5 мільйонів активних і високонавантажених сайтів використовують цей метод, що становить близько 8 % усіх активних сайтів і 17 % світового трафіку. Проте, як і кожна технологія, клієнтський рендеринг має свої недоліки.

Ці недоліки впливають на різні аспекти функціонування, починаючи від вразливості захисту додатка й закінчуючи проблемами з індексацією в пошукових системах. Проте найбільшою проблемою є збільшення обсягу файлів, що передаються через інтернет для завантаження та перегляду додатка. У масштабах звичайного застосування це не є критичним, але для великого високонавантаженого проєкту, який щодня відвідують десятки мільйонів користувачів, це стає суттєвою проблемою, адже створює значне навантаження на мережу.

Постановка проблеми. На 2023 рік середній обсяг трафіку, що циркулює в Інтернеті, становить приблизно 150,7 ексабайта на місяць, що дорівнює 150 мільярдам гігабайт [1]. За останні п'ять років цей показник зріс на 21 %, і тенденція до зростання триває щороку. Інфраструктура інтернету є найбільшою та найскладнішою для обслуговування у світі. Вона постійно вдосконалюється: традиційні комунікації поступаються місцем оптоволокну, а пропускна спроможність мережі стрімко зростає. Проте, на жаль, це зростання відбувається не так швидко, як збільшення обсягів трафіку.

Кожен вебдодаток забезпечує багатий інтерактивний досвід, що сприяє зручній та ефективній комунікації з користувачами. Це охоплює функції, такі як заповнення форм, перегляд та завантаження даних, а також їх обробка і багато іншого. Протягом останнього десятиліття 82 % проєктів перейшли на фреймворки для клієнтських додатків, такі як Angular, React, Vue та інші, що значно поліпшило інтерактивність та спростило розробку. Цей перехід кардинально змінив підходи до створення вебдодатків, надаючи розробникам зручні інструменти для роботи, а користувачам — швидкі, зручні та якісні рішення.

Ціна інтерактивності визначається розміром додатка. Коли користувач вперше завантажує сторінку, він отримує невеликий HTML-файл разом із великим JavaScript-файлом, який відповідає за формування сторінки та забезпечує інтерактивні елементи [1]. Крім того, кожен запит до сервера, що надсилається додатком для обробки даних, також має свої розміри, що додатково навантажує мережу.

Таким чином, зручність розробки, підтримки та продуктивність додатка додає нові проблеми, такі як збільшення розміру файлу додатка, проблеми з пошуковими системами та проблеми з розподілом ресурсів.

Аналіз останніх публікацій у напрямку клієнтського рендерингу свідчить про занепокоєння наукової спільноти проблемою клієнтського рендерингу. Багато авторів описують та наводять приклади проблем із пошуковими системами, продуктивність на слабких пристроях, а також проблем з кешуванням та безпекою додатка.

Однією з основних проблем є надмірне завантаження світового трафіка, яке збільшується швидше за розвиток комунікаційних та апаратних приладів, які забезпечують роботу світової мережі [2].

Значна увага приділяється переліку практик та переваг, які надає клієнтський рендеринг, оскільки цей підхід дуже спрощує роботу розробників та робить добре підтримуваним та легко розширюваним. Використання підходу Pagelets, зручна навігація всередині проєкту та зниження навантаження на сервер робить підхід серверного рендерингу надзвичайно зручним та перспективним при виборі технології розробки [3].

Для оптимізації існуючого проєкту описані такі методики, як меморизація компонентів, оптимізація контексту та стану кожного компонента й відкладене завантаження компонентів [7]. Ці методики допомагають покращити рендеринг додатка та трохи зменшити розмір JavaScript файлу, проте не можуть виправити корінні проблеми підходу клієнтського рендерингу. Тому розглянуто інші методики рендерингу, які замінюють клієнтський рендеринг та позбавляють проєкт багатьох його проблем, таких як серверний рендеринг [3] та статична генерація [4]. Проте відсутній детальний опис проблеми клієнтського рендерингу, який зміг би продемонструвати, які технічні та архітектурні рішення накладають обмеження та спричиняють проблеми під час реалізації проєктів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Для ефективного вирішення цієї проблеми та розробки адекватних рішень необхідно глибоке розуміння витоків цієї ситуації, причин її виникнення, а також аналіз тих аспектів, зміна яких може сприяти загальному покращенню. Це передбачає всебічний опис проблем, пов'язаних із клієнтським рендерингом, детальний розбір принципів його роботи та вивчення реалізації модулів, що призводять до зниження продуктивності, уразливостей у безпеці та інших труднощів.

Важливо розглянути, як саме механізми клієнтського рендерингу впливають на ефективність завантаження та відображення вебсторінок. Дослідження цих процесів дозволить виявити ключові фактори, які спричиняють затримки в рендерингу, а також визначити можливі шляхи оптимізації. Серед важливих аспектів, які потребують уваги, можна виділити управління ресурсами, оптимізацію JavaScript-коду, а також покращення методів завантаження та кешування даних.

Це дозволить не тільки знизити навантаження на мережу, але й підвищити загальну продуктивність вебдодатків, а також забезпечити вищий рівень безпеки, що вкрай важливо в умовах зростаючих кіберзагроз. Зосередившись на цих питаннях, можна досягти комплексного вирішення проблеми клієнтського рендерингу, що позитивно вплине на користувацький досвід загалом.

Мета статті. Метою цієї статті є загальний опис проблематики клієнтського рендерингу в умовах сучасної всесвітньої мережі. А також перегляд альтернативних підходів, які вирішують частину проблем клієнтського рендерингу.

Виклад основного матеріалу.

Клієнтський рендеринг — це метод, за якого вебдодаток або його елементи формуються безпосередньо у браузері користувача, а не на сервері. Цей підхід здобув популярність завдяки таким фреймворкам, як React, Vue.js, Angular, Svelte та інші [5]. Він

забезпечує розробникам можливість створювати динамічні та інтерактивні вебдодатки, оскільки основна обробка відбувається на стороні клієнта. Це зменшує навантаження на сервер, адже він виконує лише роль API для надання даних. Завдяки цьому, розробка стає більш гнучкою та зручною, що дозволяє швидше реалізовувати нові функціональні можливості. Крім того, клієнтський рендеринг покращує користувацький досвід завдяки швидким переходам між сторінками без повторного завантаження.

Деталі реалізації в різних фреймворках можуть відрізнятися, проте основний принцип взаємодії клієнта в них однаковий:

1. Сервер отримує запит на отримання сторінки.
2. Сервер повертає на клієнт базовий HTML файл та JavaScript файл який має відобразити сторінку.

3. JavaScript файл будує та відображає сторінку в браузері.

На рис. 1 зображена схема роботи клієнтського рендерингу.



Рис. 1. Схема роботи клієнтського рендерингу

Джерело: розроблено авторами.

Однією з ключових концепцій, які стоять за клієнтським рендерингом, є використання Virtual DOM. DOM (Document Object Model) — це програмний інтерфейс, який представляє структуру HTML або XML документів. Багато сучасних фреймворків, таких як React, Angular і Vue.js, використовують Virtual DOM для оптимізації процесу рендерингу. Virtual DOM — це легка копія реального DOM, яка дозволяє фреймворку відстежувати зміни у стані програми без безпосередньої взаємодії з реальним DOM, що є дорогим процесом [6]. Коли стан програми змінюється, фреймворк оновлює Virtual DOM, а потім порівнює його з попередньою версією, визначаючи, які зміни потрібно внести до реального DOM. Це дозволяє зменшити кількість маніпуляцій з DOM і підвищити загальну продуктивність вебдодатка.

Клієнтський рендеринг дозволяє досягти високої інтерактивності вебдодатків, оскільки зміни в інтерфейсі можуть бути реалізовані без перезавантаження сторінки. Це досягається за рахунок використання AJAX-запитів або Fetch API для динамічного отримання даних з сервера. Коли користувач взаємодіє з елементами інтерфейсу, JavaScript виконує запити на сервер для отримання нових даних або оновлення існуючих, а потім рендерить ці дані на сторінці. Це дозволяє створювати односторінкові додатки (SPA), де користувач відчуває безшовний перехід між різними частинами програми.

Механізм роботи клієнтського рендерингу в браузері. Після того як браузер отримує необхідні файли, як показано на рис. 1, він формує базову структуру сторінки з HTML-документа. На цьому етапі створюється DOM-дерево без контенту, а також визначаються всі доступні стилі для побудови CSSOM (CSS Object Model) — структури, що представляє стилі для кожного елемента в DOM. Далі браузер поєднує DOM і CSSOM, створюючи Render Tree — дерево видимих елементів з відповідними стилями.

Після цього браузер починає обробляти JavaScript-код, який є ключовим елементом у клієнтському рендерингу, оскільки відповідає за побудову інтерфейсу та завантаження контенту. JavaScript може мати атрибути `async` або `defer`. Скрипти з атрибутом `defer` завантажуються паралельно з парсингом HTML і виконуються після побудови DOM, тоді як `async`-скрипти завантажуються та виконуються відразу після завантаження, незалежно від завершення парсингу HTML [7].

Коли JavaScript оновлює DOM, наприклад, додаючи нові елементи чи змінюючи текст, браузер відображає ці зміни. Процес включає кілька кроків:

1. Оновлення Render Tree: браузер оновлює дерево для відображення нових або видалення зайвих елементів.

2. Перерахунок стилів: якщо змінюються CSS-властивості, браузер перераховує стилі для оновлених елементів.

3. Розміщення: визначаються розміри й позиції елементів.

4. Перерисовка: браузер додає кольори, зображення та інші візуальні елементи.

Після початкового рендерингу сторінка стає готовою для взаємодії. JavaScript обробляє події (наприклад, кліки або введення тексту), що дозволяє створювати динамічний контент без перезавантаження сторінки:

5. При обробці подій JavaScript реагує на дії користувача, змінюючи DOM, наприклад, завантажуючи нові дані під час кліку.

6. Динамічне оновлення інтерфейсу: якщо користувач змінює фільтри на сторінці магазину, JavaScript може надіслати запит на сервер для отримання відфільтрованих даних та оновити відображений список без перезавантаження сторінки.

На рис. 2 зображено механізм роботи клієнтського рендерингу в браузері.



Рис. 2. Механізм роботи клієнтського рендерингу в браузері

Джерело: розроблено авторами.

Проблеми з пошуковими системами. У клієнтському рендерингу проблеми з SEO (Search Engine Optimization) виникають через те, що браузери та пошукові системи індексують вебсторінки. Оскільки клієнтський рендеринг передбачає побудову контенту та інтерфейсу за допомогою JavaScript після завантаження початкового HTML, основний контент стає доступним лише після виконання цього JavaScript-коду [8]. Це створює кілька значних проблем для SEO, оскільки більшість пошукових систем орієнтована на традиційний HTML, щоб швидко та ефективно індексувати сторінки:

1. Відтерміноване завантаження контенту: на відміну від серверного рендерингу, де HTML-документ містить усі важливі дані відразу, при клієнтському рендерингу HTML спочатку завантажувється в мінімальному обсязі, а повноцінний контент підтягується та

формується JavaScript'ом. Це означає, що при першому завантаженні сторінки може виглядати "порожньою" або мінімальною, поки JavaScript не виконає завантаження необхідного контенту з API або серверу.

2. Виконання JavaScript ботами пошукових систем: сучасні пошукові системи, такі як Google, здатні виконувати JavaScript, щоб індексувати сторінки з клієнтським рендерингом. Однак цей процес є складнішим і вимагає більше ресурсів, тому обробка JavaScript-контенту часто виконується із затримкою або в обмеженому обсязі. Обмеження виконання JavaScript: Виконання JavaScript вимагає більше ресурсів, ніж парсинг звичайного HTML, тому Google може обмежувати частоту та глибину обробки JavaScript на певних сайтах. Друга хвиля індексації: Часто сторінки з JavaScript проходять через "другу хвилю індексації", коли Google спочатку індексує базовий HTML, а пізніше повертається для обробки JavaScript. Це може створювати затримки в індексації контенту і, як результат, уповільнювати відображення сторінки в результатах пошуку.

3. Проблеми з метатегами та попередніми переглядами сторінок: метатеги які критично важливі для SEO, також зазвичай генеруються за допомогою JavaScript у клієнтському рендерингу. Оскільки JavaScript не виконується відразу, пошукові системи можуть не побачити ці метатеги вчасно для першочергової індексації. Це може негативно вплинути на ранжування сторінки та її привабливість у результатах пошуку, адже користувачі бачать саме метаопис у сніпеті.

4. Зменшена доступність контенту для зовнішніх сервісів: контент, що створюється динамічно через JavaScript, часто стає доступним для індексації та перевірки тільки після завантаження та виконання коду. Це ускладнює доступ до такого контенту для сторонніх сервісів, що також може включати сторонні системи аналітики, сервісів попереднього завантаження або систем, які використовуються для аудиту SEO. Зокрема, ключові елементи SEO і внутрішні посилання, що генеруються JavaScript, можуть бути не доступні для індексації під час первинного сканування, що знижує релевантність сторінки та може погіршити її позицію в результатах пошуку.

5. Вплив на швидкість сторінки та користувацький досвід: швидкість завантаження сторінки є важливим фактором для SEO, а клієнтський рендеринг часто призводить до затримок у відображенні контенту. Це може спричинити високий показник відмов, оскільки користувачі не бажають чекати, поки сторінка повністю завантажиться і відобразить основний контент. Google враховує ці поведінкові метрики у своїх алгоритмах ранжування, тому клієнтський рендеринг, який призводить до повільного завантаження сторінки, може мати негативний вплив на SEO.

Можливі рішення для покращення SEO при клієнтському рендерингу - це серверний, гібридний та динамічний рендеринг. Ці рішення дозволяють згенерувати контент або частину контенту на сервері та допомагають додатку визначити чи є користувач ботом пошукової системи, і надає йому серверно-рендерену версію сторінки для індексації.

Серверний рендеринг пропонує готовий HTML для ботів – він створює повністю сформовану HTML-сторінку на сервері, яка відправляється браузеру чи пошуковому боту. Це спрощує індексацію, оскільки пошукові системи не потребують виконання JavaScript. Також при використанні серверного рендерингу контент залишається однаковим для користувачів і пошукових ботів, що запобігає помилкам індексації.

У свою чергу, гібридний рендеринг комбінує характеристики серверного та клієнтського рендерингу, він дозволяє вибірково застосовувати SSR для сторінок, критичних для SEO (наприклад, цільові сторінки, статті), і CSR для менш важливих (особисті кабінети, динамічні компоненти), а також надає легкий доступ до метаданих. Це дає змогу оптимізувати індексацію найважливішого контенту.

Динамічний рендеринг забезпечує не меншу оптимізацію SEO, ніж наведені вище варіанти. Це підхід до рендерингу орієнтований на ботів, які аналізують та індексують сторінки в всесвітній мережі. Сервер генерує HTML лише для пошукових систем і соціальних медіаботів, що забезпечує ідеальні умови для індексації навіть для JavaScript-інтенсивних сайтів. Боти отримують попередньо сформований HTML, а користувачі — клієнтський рендеринг. Це дозволяє зберегти інтерфейс для користувачів і SEO-дружність для пошукових систем.

Найбільший приріст продуктивності SEO забезпечую саме серверний рендеринг, проте гібридний та динамічний рендеринг також вирішують проблему поганої SEO оптимізації, яка притаманна клієнтському рендерингу.

Проблема з безпекою додатка. Додатки з клієнтським рендерингом мають низку потенційних проблем із безпекою, які менш виражені в серверному рендерингу. Нижче будуть наведені основні вразливості додатка з клієнтським рендерингом та порівняння цих проблем із використанням серверного рендерингу.

Оскільки в клієнтському рендерингу основна логіка виконується на стороні клієнта, це створює більшу поверхню для атак. Зловмисники можуть переглядати JavaScript-код, аналізувати його на предмет вразливостей і використовувати ці знання для зловживань, наприклад, викрадення даних або несанкціонованого доступу до функцій програми. У серверному рендерингу більшість бізнес-логіки залишається на сервері, тому клієнт отримує лише готовий HTML, що ускладнює атаки.

Однією з головних проблем клієнтського рендерингу є ризик атак типу XSS, оскільки дані, отримані через API, часто динамічно додаються до DOM. Якщо ці дані недостатньо оброблені, зловмисники можуть вставляти й виконувати шкідливий код. У SSR сервер виконує рендеринг сторінок, попередньо обробляючи й екрануючи дані, що знижує ризик XSS-атак. Крім того, у клієнтському рендерингу конфіденційні дані, такі як токени автентифікації, часто зберігаються на клієнті у локальному сховищі чи куках. Це створює ризик витоку таких даних у разі атак типу XSS або доступу до сховища через інші вразливості. У SSR обробка конфіденційних даних відбувається на сервері, що знижує ризик їхнього витоку.

Ще однією проблемою клієнтського рендерингу є доступність внутрішніх маршрутів. Оскільки маршрути зберігаються на клієнті, зловмисники можуть переглянути їх і спробувати отримати доступ до захищених сторінок, якщо серверний контроль доступу налаштований неправильно. У серверному рендерингу маршрути обробляються сервером, що гарантує перевірку прав доступу перед наданням контенту.

Клієнтський рендеринг також піддається ризикам, пов'язаним із прямими викликами API, оскільки браузер виконує ці запити. Якщо API недостатньо захищений, зловмисники можуть його використовувати для несанкціонованого доступу або виконання небажаних дій. У SSR сервер виступає посередником між клієнтом і API, що додає рівень захисту.

Проблема з використанням додатків з клієнтським рендерингом на слабких пристроях (на прикладі мобільних пристроїв). Використання додатка з клієнтським рендерингом на мобільних пристроях має свої особливості та викликає певні проблеми, пов'язані з обмеженнями ресурсів, продуктивності та досвіду користувача. Основні аспекти цих проблем включають:

1. Обмежена продуктивність мобільних пристроїв: Мобільні пристрої, особливо бюджетні або застарілі моделі, мають меншу обчислювальну потужність у порівнянні з десктопами. Клієнтський рендеринг потребує значної кількості ресурсів процесора та оперативної пам'яті, адже пристрій повинен виконувати багато JavaScript-коду, рендерити компоненти, обробляти анімації тощо [9]. Цей процес може призвести до затримок, підвисань або зниження продуктивності додатка.

2. Енергоспоживання та перегрів: Інтенсивне використання процесора для клієнтського рендерингу вимагає більше енергії, що швидше розряджає батарею пристрою. Крім того, довготривале використання ресурсів може призвести до перегріву мобільного пристрою. Це не лише впливає на комфорт користувача, але й може знижувати загальну продуктивність, адже пристрій автоматично обмежує потужність процесора під час перегріву.

3. Проблеми з мережевим з'єднанням: Клієнтський рендеринг часто передбачає, що значна частина логіки додатка завантажується з сервера. На мобільних пристроях, особливо за умов низької швидкості або нестабільного з'єднання, це може призвести до значних затримок завантаження. Якщо додаток повністю залежить від клієнтського рендерингу, при слабкому з'єднанні він може залишатися неактивним протягом тривалого часу або навіть не завантажитися взагалі.

4. Важкість першого завантаження (Initial Load): У випадку клієнтського рендерингу, браузеру мобільного пристрою потрібно завантажити й обробити весь код додатка перед тим, як користувач побачить початковий вміст. Це створює відчутну затримку під час першого завантаження, особливо для великих додатків. У мобільних мережах це може суттєво збільшити час завантаження і негативно вплинути на користувацький досвід.

5. Обмеження кешування та місця на пристрої: Мобільні пристрої мають обмежене місце для кешування даних браузером, і клієнтський рендеринг вимагає завантаження великої кількості ресурсів, які зазвичай кешуються для пришвидшення роботи додатка. Якщо кеш заповнюється або видаляється через інші додатки чи системні обмеження, це може призвести до повторного завантаження великих обсягів даних, що знову ж таки впливає на продуктивність та швидкість додатка.

На пристроях із низькою продуктивністю важливо звести до мінімуму обчислення, необхідні для рендерингу та відображення вебдодатка, щоб зменшити навантаження на процесор. Існують різні підходи для оптимізації клієнтського рендерингу та зменшення розміру коду на стороні клієнта, але зазвичай навіть після оптимізації залишається великий JavaScript-файл, який потрібно виконувати на пристрої користувача. Найбільш продуктивним рішенням для мобільних пристроїв є використання готових HTML-сторінок, тому підходи серверного рендерингу або статичної генерації сторінок підходять найкраще: вони дозволяють відправляти вже згенерований HTML-файл із мінімальним обсягом JavaScript-коду [10].

Проблема значного обсягу файлів, які передаються мережею для відображення вебсторінки. Це головна проблема клієнтського рендерингу, яка лежить в основі його роботи та побудови проекту, вона є надзвичайно поширеною, особливо в масштабних додатках [11]. Ці файли можуть швидко зростати в об'ємі через особливості клієнтського рендерингу та способу розробки. Приклади проблем, які призводять до великого обсягу файлів:

1. Повне завантаження бібліотек і компонентів: Часто застосунок містить безліч компонентів і сторонніх бібліотек, які можуть збільшувати розмір фінального JavaScript-файлу. Проект додає вагу через обробку стану, контекст і рендеринг компонентів. Якщо не застосовувати розділення коду, все це завантажується разом, навіть коли не потрібне на певній сторінці.

2. Великі залежності: додатки зазвичай покладаються на безліч сторонніх бібліотек для оптимізації розробки. Наприклад, використання бібліотек для навігації, роботи з датами, або бібліотеками утиліт. Якщо бібліотеки підключені без ретельного вибору окремих модулів (tree-shaking), це призводить до завантаження непотрібного коду.

3. Динамічні та анімовані компоненти: Складні анімації, інтерактивні елементи або бібліотеки, які реалізують цей функціонал, додають значну кількість JavaScript-коду. Інколи для реалізації інтерактивності потрібно імпортувати великі бібліотеки з багатою функціональністю, яку частково не використовують, але вона все одно потрапляє в збірку.

4. Підтримка старих браузерів: Для забезпечення сумісності зі старими браузерами у додатку часто додаються поліфіли. Інструменти, такі як Vabel можуть конвертувати сучасний код у більш сумісний із різними браузерами, але це також збільшує загальний обсяг коду.

5. Відсутність оптимізації бандлу: Іноді додаток не проходить достатньо мініфікації, а коментарі, відладочні логи та неефективний код залишаються в файлі. Інструменти, як Webpack або Parcel, можуть автоматично мінімізувати файли і видаляти зайві фрагменти, але якщо вони налаштовані некоректно або не використовуються, це призводить до збільшення розміру.

6. Вбудовані стилі та CSS-in-JS: Використання CSS-in-JS або бібліотек, як styled-components і emotion, збільшує розмір JavaScript-файлів, оскільки стилі обробляються всередині JS. Це дозволяє реалізувати динамічні стилі, але також додає ваги до кожного компонента.

Для вирішення цих проблем існує багато практик, але вони спрямовані скоріше на оптимізацію, ніж на повне вирішення проблеми. Насамперед використання розділення коду за допомогою вбудованих інструментів у фреймворку, що дозволяє завантажувати компоненти лише за потреби та уникати надмірного коду на початку. Це особливо корисно для завантаження важких компонентів або сторінок, до яких користувач звертається рідко [12]. Також хорошою практикою оптимізації є застосування tree-shaking для видалення невикористовуваного коду з бібліотек – це значно зменшує збірку, якщо, наприклад, використовувати лише окремі функції з бібліотек. Важливо підключати тільки потрібні частини бібліотек, уникаючи імпорту повного пакету, якщо він не потрібен повністю. Базовою потребою оптимізації проекту є мініфікація та налаштування збирачів, як Webpack чи Parcel, вони дозволяють зменшити об'єм файлу за рахунок видалення пробілів, коментарів і зайвого коду [13]. Використання динамічного імпорту також може пришвидшити завантаження, оскільки код завантажується лише тоді, коли він дійсно потрібен. Для обробки стилів CSS-in-JS варто обмежувати використання, оскільки вони додають JavaScript вагу. Інтернаціоналізацію варто реалізовувати так, щоб завантажувати лише потрібну локалізацію, а не всі мови одразу.

Цілковите вирішення проблем клієнтського рендерингу неможливе, оскільки збірка та рендеринг додатка – це складні процеси, що проходять через кілька етапів та потребують багатьох залежних бібліотек і функцій, які працюють разом для створення кінцевого продукту. Усі ці елементи мають бути об'єднані в єдиний JavaScript файл, який буде надіслано користувачу для побудови додатка. Одним зі способів подолати багато труднощів клієнтського рендерингу є перехід на серверний рендеринг. У цьому підході сторінки вже сформовані на сервері, тому користувач отримує готовий HTML і компактний JavaScript файл, що значно зменшує розмір передаваних даних [14].

Висновки. Кожна з проблем, пов'язаних із використанням клієнтського рендерингу у вебдодатках, має свої особливі причини та впливає на ефективність рендерингу й відображення додатка. Більшість із цих проблем має технічний характер, але також присутні питання логічного та семантичного рівня.

Найбільш серйозною проблемою клієнтського рендерингу є великий розмір JavaScript-файлів, які користувачам потрібно завантажувати для коректного відображення додатка. Це впливає не тільки на якість користувацького досвіду, але й на розвиток інтернет-інфраструктури загалом. Щоденне завантаження великих файлів на мільйонах вебсайтів суттєво збільшує глобальний трафік, що робить клієнтський рендеринг недостатньо оптимальним з погляду прогресу та еволюції вебтехнологій.

Клієнтський рендеринг став справжнім проривом у веброботці та підходах до створення великих, високонавантажених додатків. Його недоліки не дозволяють йому

статі універсальним рішенням для розробки, проте методи, створені на його основі, вирішили багато з цих проблем і стали одним із найперспективніших напрямів у розвитку вебтехнологій.

Більшість проблем клієнтського рендерингу можна вирішити за допомогою серверного рендерингу та статичної генерації сторінок. Ці методи ускладнюють процес розробки та деплоювання, оскільки вимагають від сервера не тільки забезпечення файлів для побудови сторінки, але й виконання логіки для генерування готових HTML-сторінок. Однак вони значно підвищують продуктивність додатка та сприяють розвитку вебтехнологій.

Список використаних джерел

1. Internet Traffic Statistics: A Look at Data Driving Online Behavior [Electronic resource] // *Gitnux.org*. – Accessed of mode: <https://gitnux.org/internet-traffic-statistics/>.
2. Iskandar, T. Comparison between client-side and server-side rendering in the web development / T. Iskandar, M. Lubis, T. Kusumasari, A. Lubis // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. – 2020. DOI:10.1088/1757-899X/801/1/012136.
3. Hao Han. Practice and Evaluation of Pagelet-Based Client-Side Rendering Mechanism / Hao Han, Yinxing Xue, Keizo Oyama, Yang Liu // *IEICE Transactions on Information and Systems*. – 2014. <https://doi.org/10.1587/transinf.E97.D.2067>.
4. Hanafi, R. Comparison of Web Page Rendering Methods Based on Next.js Framework Using Page Loading Time Test / Roy Hanafi, Abd Haq, Ninik Agustin // *Teknika*. – 2024. – Vol. 13, № 113(1). – Pp. 102-108. DOI: <https://doi.org/10.34148/teknika.v13i1.769>.
5. Moore R. Compare and Contrast: CSR, SSR, and SSG in NextJS [Electronic resource] / Rick Moore // *Medium*. – Accessed of mode: <https://medium.com/nerd-for-tech/compare-and-contrast-csr-ssr-and-ssg-in-nextjs-58e3caf2e15e>
6. Zou, Y. Virtual DOM coverage for effective testing of dynamic web applications. 2014 International Symposium on Software Testing and / Y. Zou, Z. Chen, Y. Zheng, X. Zhang, Z. Gao // *Proceedings of 2014 International Symposium on Software Testing and Analysis, ISSTA*. - 2014. – Pp. 60-70. DOI: <https://doi.org/10.1145/2610384.2610399>.
7. Bhatt, D. ReactJS: A Comprehensive Analysis of its features, Performance, and Suitability for Modern Web Development / D. Bhatt, K. Parekh, M. Minat, B. Patel // *Interantional Journal Of Scientific Research In Engineering And Management*. – 2023. – Vol. 07. DOI 07.10.55041/IJSREM25667.
8. Patel, V. Analyzing the Impact of Next.JS on Site Performance and SEO / V. Patel // *International Journal of Computer Applications Technology and Research* – 2023. – Vol. 12. – Pp. 24-27. DOI:10.7753/IJCATR1210.1004.
9. Ardiyanto, R. Analisa Performasi Metode Client Side Rendering, Server Side Rendering, dan Incremental Static Regeneration dalam Proses / R. Ardiyanto, E. Ardhiyanto // *Website Rendering. Computer Science (CO-SCIENCE)*. – 2024. – Vol. 4(1). – Pp. 19-27 DOI: 10.31294/coscience.v4i1.2427.
10. Conti, M. Content Delivery Policies in Replicated Web Services: Client-Side vs. Server-Side / M. Conti, E. Gregori, W. Lapenna // *Cluster Computing*. – 2005. – Vol. 8(1). – Pp. 47-60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-004-4436-5>.
11. Nefe Emadamerho-Atori. What is Clinet-side rendering (CSR)? – Accessed of mode <https://prismic.io/blog/client-side-rendering>.
12. Vallamsetla K. The Impact of Server-Side Rendering on UI Performance and SEO // Karthik Vallamsetla / *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. – 2024. DOI: 10.795-804. 10.32628/CSEIT241051067.
13. Zammetti, F. Modern Full-Stack Development: Using TypeScript, React, Node.js, Webpack, and Docker / F. Zammetti. – 2020. – 396 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-5738-8.
14. Venkata Naga Sai Kiran Challa. Comprehensive Analysis of Modern Application Rendering Strategies: Enhancing Web and Mobile User Experiences / Venkata Naga Sai Kiran // *Journal of Engineering and Applied Sciences Technology*. – 2022. DOI: 10.47363/JEAST/2022(4)248.

References

1. Internet Traffic Statistics: A Look at Data Driving Online Behavior. (n.d.). *gitnux.org*. <https://gitnux.org/internet-traffic-statistics>.

2. Iskandar, T., Lubis, M., Kusumasari, T., Lubis, A. (2020). Comparison between client-side and server-side rendering in the web development. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 801. 012136. 10.1088/1757-899X/801/1/012136.
3. Han, H., Xue, Y., Liu, Y., Oyama, K. (2014). Practice and Evaluation of Pagelet-Based Client-Side Rendering Mechanism. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*. E97-D. 2067-2083. 10.1587/transinf.E97.D.2067.
4. Hanafi, Roy & Haq, Abd & Agustin, Ninik. (2024). Comparison of Web Page Rendering Methods Based on Next.js Framework Using Page Loading Time Test, 13, 102-108. 10.34148/teknika.v13i1.769.
5. Moore, R. (2021). Compare and Contrast: CSR, SSR, SSG. *medium.com*. <https://medium.com/nerd-for-tech/compare-and-contrast-csr-ssr-and-ssg-in-nextjs-58e3caf2e15e>.
6. Zou, Y., Chen, Z., Zheng, Y., Zhang, X., Gao, Z. (2014). Virtual DOM coverage for effective testing of dynamic web applications. *Proceedings of 2014 International Symposium on Software Testing and Analysis, ISSTA 2014*. 10.1145/2610384.2610399.
7. Bhatt, D., Parekh, K., Minat, M., Patel, B. (2023). ReactJS: A Comprehensive Analysis of its features, Performance, and Suitability for Modern Web Development. *Interantional Journal Of Scientific Research In Engineering And Management*, 07. 10.55041/IJSREM25667.
8. Patel, V. (2023). Analyzing the Impact of Next.JS on Site Performance and SEO. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, 12, 24-27. 10.7753/IJCATR1210.1004.
9. Ardiyanto, R., Ardianto, E. (2024). Analisa Performasi Metode Client Side Rendering, Server Side Rendering, dan Incremental Static Regeneration dalam Proses Website Rendering. *Computer Science (CO-SCIENCE)*, 4, 19-27. 10.31294/coscience.v4i1.2427.
10. Conti, M., Gregori, E., Lapenna, W. (2005). Content Delivery Policies in Replicated Web Services: Client-Side vs. Server-Side. *Cluster Computing*, 8, 47-60. <https://doi.org/10.1007/s10586-004-4436-5>.
11. Emadamerho-Atori, N. What is Client-side Rendering (CSR)? [Electronic resource] / Nefe Emadamerho-Atori // Prismic: Headless Page Builder - Launch and Iterate Faster. <https://prismic.io/blog/client-side-rendering>
12. Vallamsetla, K. (2024). The Impact of Server-Side Rendering on UI Performance and SEO. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 10, 795-804. 10.32628/CSEIT241051067.
13. Zammetti, F. (2020). Modern Full-Stack Development: Using TypeScript, React, Node.js, Webpack, and Docker. 10.1007/978-1-4842-5738-8.
14. Challa, V. N. S. K. (2022). Comprehensive Analysis of Modern Application Rendering Strategies: Enhancing Web and Mobile User Experiences. *Journal of Engineering and Applied Sciences Technology*, 1-6. 10.47363/JEAST/2022(4)248.

Отримано 20.12.2024

UDC 004.9

Kyrylo Nasenok¹, Maria Voitsekhovska²

¹PhD student, recipient of the Doctor of Philosophy degree in specialty 122
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: kaboo@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-0972-7086>

²PhD, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Software Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: m.voitsekhovska@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1711-101X>

CLIENT-SIDE RENDERING ISSUES IN THE MODERN WORLDWIDE NETWORK

Client-side rendering is an approach to rendering web applications, allowing content to be processed and displayed directly in a browser. This method enables web developers to create modular and component-based code that is easily extendable, reusable, and simplifies application maintenance. Client-side rendering has revolutionized the web industry, as evidenced by its widespread adoption: as of 2024, approximately 9.5 million websites, or 8% of all active websites worldwide, use this approach, handling approximately 17% of total global web traffic.

Despite its advantages, client-side rendering has certain limitations. It can affect various aspects of security and SEO optimization due to increased vulnerability to attacks and challenges in search engine indexing. The most significant drawback of this approach is the substantial increase in the size of files required for complete application loading and rendering. While this is not critical for smaller projects, it can be a significant strain on network resources for large, high-traffic sites with millions of daily visitors. This requires careful attention to content optimization and the use of additional tools to maintain stable application performance.

The problem highlights the growth of global web traffic in recent years and the need to optimize this traffic, as it grows faster than the physical communications infrastructure that carries it around the world. It also underscores that while client-side rendering enhances development ease, maintainability, and application performance, it introduces new challenges such as increased application file size, SEO issues, and resource allocation difficulties.

This article provides an overview of current issues with client-side rendering and their impact on the performance and functionality of web applications. It analyses the most common client-side rendering issues, including challenges with search engines, usability on low-performance devices, and the large file sizes required to render and display the application. It also examines practices and approaches for addressing these issues.

Future research should focus on optimising existing solutions and migrating current projects to technologies that address client-side rendering challenges, such as server-side rendering and static page generation. In addition, it is important to investigate potential migration difficulties, as these methods require more server-side processing, which adds additional semantics, configuration and deployment work to the project.

Keywords: *client-side rendering; web application; client application; optimization; worldwide network; security; search engine.*

Fig.: 2. References: 14.

Олександр Миколайович Полевод

аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: oleksandr.polevod23@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0009-0007-0885-8625>

**КЛЕПТОГРАФІЯ В КОНТЕКСТІ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ. КЛАСИФІКАЦІЯ
КЛЕПТОГРАФІЧНИХ АТАК**

Стаття досліджує клептографію як наукову дисципліну, що виходить за межі криптографії та охоплює ширший спектр загроз інформаційної безпеки. Автор аналізує сучасні клептографічні атаки, які використовують приховані канали для витоку даних, зокрема через апаратні та програмні вразливості, а також побічні канали, такі як енергоспоживання і таймінги. Пропонується класифікація цих атак і підкреслюється необхідність комплексного підходу до їх виявлення та нейтралізації, що включає криптоаналіз, інженерію та фізичний аналіз систем.

Ключові слова: клептографія; криптографія; побічний канал; класифікація; реверс-інжиніринг; захист інформації.

Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Із середини 90-х років клептографія та її предметне поле були зведені переважно до дослідження прихованих та побічних комунікацій і асиметричних бекдорів у криптоалгоритмах (таких як генерація та обмін ключами, цифровий підпис, шифрування тощо). З розвитком інформаційних технологій невпинно зростає і інформаційна злочинність, представники якої шукають все більш вишукані та приховані способи для реалізації своїх намірів щодо даних користувачів. До того ж спецслужби держав також мають свої інтереси у сфері контролю інформаційної діяльності населення, використовуючи різноманітні засоби програмно-апаратної природи.

Останнім часом з'являється дедалі більша кількість повідомлень про виявлення сторонніх модулів, не заявлених офіційною специфікацією у пристроях для широкого використання (смартфони, комп'ютери та інші засоби зв'язку). Автори таких заяв стверджують, що виявлені елементи та модулі потенційно мають шпигунське призначення і здатні непомітно для кінцевого користувача передавати певні дані за допомогою прихованих каналів. На фоні таких інцидентів представники, зацікавлених у збереженні контролю над державною безпекою скорочують використання технічних засобів, виробленої у «недружніх країнах» через загрозу компрометації даних, що становлять службу або державну таємницю.

Водночас представники спецслужб засобами державної політики «примують» виробників інформаційних пристроїв впроваджувати модифікації, які дозволяють отримувати дані про роботу цих пристроїв без відома користувачів. У більшості випадків така «необхідна жертва» для безпеки залишається непоміченою і використовується виключно в законних цілях, хоча моральний бік цього явища залишається спірним і, ймовірно, філософським питанням. Однак із невпинним поширенням інформаційних пристроїв ці «лазівки» дедалі частіше виявляються і представниками злочинності. У таких випадках навмисне імплементований таємний канал використовується для крадіжки особистих даних, що несе пряму шкоду для звичайних користувачів.

Постановка проблеми.

У сучасних умовах стрімкого розвитку інформаційних технологій та їх використання не лише для легальних цілей, але й у протиправній діяльності, проблема захисту інформації набуває нового значення. Клептографія, яка вивчає приховані канали витоку даних і методи імплементування уразливостей у системах безпеки, досі переважно розглядається у вузькому контексті криптографії. Однак її потенціал для аналізу загроз інформаційної безпеки є значно ширшим. Зловмисники та державні спецслужби

використовують лазівки у програмному забезпеченні, апаратних компонентах і криптографічних системах для прихованого доступу до конфіденційних даних. У таких умовах постає питання, як забезпечити надійний захист інформаційних систем, мінімізуючи ризики зловживань прихованими каналами. Це вимагає ширшого підходу до клептографії, включаючи комплексне дослідження всіх рівнів системи, від апаратного до програмного, та розробку методів протидії таким атакам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика клептографічних атак активно досліджується, хоча значна частина робіт зосереджена на конкретних аспектах або прикладах їх реалізації. У фундаментальних дослідженнях Young і Yung [1; 2] було представлено концепцію клептографії як способу використання криптографії для створення прихованих бекдорів у системах безпеки. Робота Janovsky, Krhovjak і Matyas [3] аналізує практичне впровадження клептографічних методів у криптографічних протоколах, зокрема TLS, пропонуючи підхід до їх виявлення та протидії. Kovalenko і Kudin [4] досліджують способи усунення пасток у криптографічних протоколах, акцентуючи увагу на створенні захищених систем без прихованих каналів. Праця Ткач та співавторів [5] висвітлює історію розвитку клептографії та визначає її місце в контексті сучасної інформаційної безпеки, акцентуючи на необхідності ширшого підходу до вивчення цієї дисципліни. Історичний кейс операції "Рубікон" [6] демонструє приклад державного рівня атак, спрямованих на використання прихованих каналів у шифрувальних пристроях.

Існуючі підходи до класифікації клептографічних атак здебільшого зосереджені на окремих аспектах, таких як криптографічні бекдори або приховані канали в шифрувальних алгоритмах. Наприклад, роботи Young і Yung акцентують увагу на криптографічних бекдорах, не охоплюючи апаратні чи програмні вразливості. Інші дослідження, такі як аналіз атак у протоколах TLS, пропонують класифікацію, але лише в межах одного рівня системи. Такий вузький підхід не враховує багаторівневий характер клептографічних загроз та їхню еволюцію в сучасних умовах. Крім цього, відсутність єдиного системного підходу ускладнює порівняння різних типів атак, їх ідентифікацію та розробку комплексних заходів захисту. Запропонована у статті класифікація клептографічних атак усуває ці недоліки завдяки багаторівневому та системному підходу. Вона охоплює атаки за цілями, методами, рівнями реалізації, складністю та виконавцями. Такий підхід дозволяє:

- Структуризувати знання: запропонована класифікація охоплює всі аспекти клептографічних атак, від системного рівня до специфічних методів, таких як атаки через побічні канали чи приховані модифікації.
- Полегшити ідентифікацію: чіткий поділ на категорії спрощує виявлення атак на різних етапах життєвого циклу системи – від розробки до експлуатації.
- Підвищити ефективність протидії: врахування всіх типів атак дозволяє розробляти комплексні заходи захисту, які враховують апаратні, програмні та фізичні аспекти.
- Забезпечити адаптивність: класифікація передбачає включення нових типів атак, що з'являються із розвитком технологій.

Таким чином, запропонована у статті класифікація є важливим кроком до створення цілісного підходу до вивчення клептографічних атак та забезпечення їхньої ефективної нейтралізації. Вона сприяє як фундаментальному розумінню цього явища, так і практичному впровадженню рішень для підвищення інформаційної безпеки.

Сучасні дослідження здебільшого аналізують методи впровадження прихованих каналів і їхній вплив на криптографічні системи, однак систематична класифікація клептографічних атак залишається недостатньо розвинутою. Це вказує на потребу в комплексних дослідженнях, спрямованих на побудову більш широких класифікацій атак з урахуванням їх цілей, методів реалізації та рівнів впровадження.

Метою статті є пропозиція змінити підхід і погляд на клептографію, як набагато ширшу дисципліну, та класифікувати шляхи та методи імплементації прихованих каналів витоку конфіденційної інформації

Виклад основного матеріалу. Клептографічні атаки – це способи прихованого доступу до даних, часто впроваджені через лазівки або спеціально створені вразливості в системах безпеки. Вони можуть використовуватися як державними органами для боротьби зі злочинністю, так і зловмисниками для шпигунства чи саботажу. Як було зазначено вище, клептографія переважно розглядалась і продовжує розглядатись як підгалузь криптографії, на що вказують класичні та новітні дослідження. На нашу думку, варто почати з класифікації клептографічних атак для забезпечення повної картини перед подальшими дослідження. Далі наведено варіант класифікації за різними принципами.

1. За метою атаки:

- Спостереження і розвідка - атаки, які спрямовані на збір інформації. Наприклад, держава може використати спеціальні лазівки, щоб відстежувати підозрілих осіб. Відомим прикладом є операція "Рубікон" [6], коли спецслужби використовували шифрувальні пристрої з лазівками, щоб читати секретні повідомлення інших країн.

- Економічне шпигунство - такі атаки спрямовані на викрадення комерційних таємниць або інтелектуальної власності. Зловмисники можуть впроваджувати лазівки в програмне забезпечення, щоб отримати важливі дані, наприклад, про нові технології.

- Саботаж - мета такої атаки в пошкодженні або зруйнуванні системи. Наприклад, атака може бути націлена на IoT-пристрої, щоб дистанційно керувати технікою або зламати її.

2. За способом атаки:

- Атаки через лазівки - це коли в систему безпеки навмисно впроваджують прихований доступ, який можна використовувати для дешифрування повідомлень. Наприклад, Slipper Chip [7] був спеціально розроблений для того, щоб правоохоронці могли легко отримати доступ до зашифрованих розмов.

- Атаки через побічні канали - це коли зловмисники використовують слабкі місця в апаратному забезпеченні, наприклад, стежать за витратами енергії або часом виконання задач для отримання даних.

- Приховані (стеганографічні) канали: - такі атаки використовують «сигнали», заховані в зашифрованих повідомленнях або підписах, щоб непомітно передати інформацію.

3. За рівнем системи:

- Системні атаки націлені на основну систему, наприклад, операційну систему чи криптографічні алгоритми. Деякі компанії, такі як Microsoft, працювали зі спецслужбами для впровадження таких лазівок.

- Атаки на рівні додатків на прикладному рівні лазівки вбудовуються в конкретні програми, як-от банківські додатки або веббраузери, через які проходить зашифрований трафік.

- Атаки на рівні апаратного забезпечення зловмисники впроваджують лазівки безпосередньо у чіпи чи інші елементи пристроїв, що робить атаку більш складною для виявлення.

4. За складністю:

- Прості атаки - їх легко впровадити й важко виявити. Наприклад, приховані канали, які дозволяють непомітно передавати невелику кількість інформації.

- Складні атаки - вимагають використання більш складних методів шифрування. Наприклад, коли зловмисники змінюють алгоритми шифрування так, що це важко помітити, але вони можуть використовувати лазівки.

5. За виконавцем атаки:

- Інсайдерські атаки - це коли самі розробники навмисно впроваджують лазівки. Наприклад, як це було [8] з Crypto AG, коли компанія, під впливом ЦРУ, розробляла шифрувальні пристрої з прихованими лазівками.

- Атаки ззовні - у цьому випадку зловмисники використовують лазівки, які були випадково або ненавмисно створені в системі.

6. За етапом впровадження:

- Атаки під час розробки - лазівки впроваджуються ще на етапі розробки криптосистем або апаратних компонентів.

- Атаки після розгортання - лазівки впроваджуються після того, як система вже працює. Це можуть бути атаки через оновлення або вразливості, які не були виявлені раніше.

7. За можливістю виявлення:

- Непомітні атаки - такі атаки спроектовані так, щоб бути повністю невидимими для користувачів і систем безпеки.

- Виявляються, але важко довести - деякі атаки можна помітити, але довести їх наявність або знайти лазівку дуже складно.

Важливим поняттям при вивченні клептографії є побічні канали витоку інформації — це неочевидні шляхи, через які зловмисники можуть отримати доступ до конфіденційних даних системи, не атакуючи безпосередньо саму криптографію або захищені алгоритми. Замість цього вони використовують властивості фізичної реалізації системи, такі як споживання енергії, час обробки операцій, випромінювання електромагнітних хвиль або звукові коливання, для вилучення чутливої інформації. Одним із класичних прикладів є атаки на основі вимірювання часу виконання криптографічних операцій: різний час обробки може вказувати на структуру ключа або інших важливих параметрів.

Пошук побічних каналів є складним завданням, оскільки вони не свідомо закладені в систему, а є результатом її фізичних характеристик. Аналіз таких каналів зазвичай вимагає спеціального обладнання та методик. Для їх виявлення використовують техніки тестування безпеки, такі як вимірювання енергоспоживання, аналіз часових затримок або моделювання електромагнітного випромінювання пристрою. Виявлення побічних каналів — це важливий крок, оскільки вони можуть бути використані для витоку даних навіть у найбільш надійних на перший погляд системах.

Заходи з нейтралізації побічних каналів включають як зміни в архітектурі системи, так і застосування контрзаходів на фізичному рівні. Наприклад, можна додавати шум до сигналу енергоспоживання або часу виконання операцій, щоб зробити їх менш інформативними для зловмисника. Інші методи включають рівномірний розподіл обчислювальних операцій, використання фізичних екранів для блокування електромагнітного випромінювання та покращення алгоритмів так, щоб вони не демонстрували очевидних закономірностей у фізичній поведінці. Ці заходи роблять побічні канали менш доступними для атак і підвищують загальний рівень безпеки системи.

Висновки. Клептографія еволюціонувала від досліджень, спрямованих на криптографічні бекдори, до більш широкого аналізу загроз інформаційної безпеки, охоплюючи апаратні, програмні та фізичні аспекти. Основна ідея клептографічних атак полягає у використанні прихованих каналів для витоку даних через вразливості на різних етапах створення та експлуатації систем. Проведена класифікація атак дозволяє виявити їх за рівнем системи, складністю, способом впровадження та метою, що сприяє кращому розумінню природи таких загроз і необхідних заходів протидії.

Результати дослідження демонструють, що клептографічні атаки виходять далеко за межі традиційної криптографії, впливаючи на весь спектр інформаційних технологій. Це підкреслює важливість комплексного підходу до захисту систем, який охоплює як розробку захищених алгоритмів, так і запобігання використанню побічних каналів витоку інформації.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення ефективних методів виявлення прихованих каналів і нейтралізації атак, а також розробку систем захисту, здатних адаптуватися до нових типів загроз. Особливу увагу слід приділити інтеграції криптоаналізу, інженерії апаратного забезпечення та аналізу фізичних процесів у загальну стратегію забезпечення інформаційної безпеки. Це дозволить створити цілісну концепцію боротьби з клептографічними атаками та підвищити рівень захисту сучасних інформаційних систем.

Список використаних джерел

1. Kleptography: Using Cryptography Against Cryptography [Electronic resource] / A. Young, M. Yung. – Accessed mode: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-69053-0_6.pdf.
2. The Dark Side of Black-Box Cryptography, or: Should we trust Capstone? [Electronic resource] / A. Young, M. Yung. – Accessed mode: https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-68697-5_8.
3. Bringing Kleptography to Real-World TLS [Electronic resource] / A. Janovsky, J. Krhovjak, V. Matyas. – 2019. – Accessed mode: <https://hal.science/hal-02294600/document>.
4. Kleptography trapdoor free cryptographic protocols [Electronic resource] / B. Kovalenko, A. Kudin – Accessed mode: <https://jrnل.nau.edu.ua/index.php/Infosecurity/article/view/13840>.
5. Ткач, Ю. Історія виникнення клептографії та її місце в безпеці інформації [Електронний ресурс] / Ю.Ткач, М. Шелест, М. Синенко, Т. Петренко // Технічні науки та технології. – 2023. – №3 (33). – С. 150–161. - Режим доступу: <http://tst.stu.cn.ua/article/view/291215>.
6. Operation Rubikon [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.zdf.de/politik/frontal/operation-rubikon-100.html>.
7. The NSA Tried This Before – What the 90s Debate Over The Clipper Chip Can Teach Us About Digital Privacy [Electronic resource] // Internet History Podcast. – Accessed mode: <https://www.internethistorypodcast.com/2014/08/the-nsa-tried-this-before-what-the-90s-debate-over-the-clipper-chip-can-teach-us-about-digital-privacy-debates/>.
8. The intelligence coup of the century [Electronic resource] // The Washington Post. – Accessed mode: <https://www.washingtonpost.com/graphics/2020/world/national-security/cia-crypto-encryption-machines-espionage/>.

References

1. Young, A., Yung, M. (1997). Kleptography: Using Cryptography Against Cryptography. Proceedings of EUROCRYPT'97: *Advances in Cryptology*, 1233, 62-74. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-69053-0_6.pdf.
2. Young, A., Yung, M. (1996). The Dark Side of Black-Box Cryptography, or: Should we trust Capstone? Proceedings of CRYPTO'96: *Advances in Cryptology*, 1109, 89–103. https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-68697-5_8.
3. Janovsky, A., Krhovjak, J., Matyas, V. (2019). Bringing Kleptography to Real-World TLS. *Genetic and Evolutionary Computing* (pp. 15-27). <https://hal.science/hal-02294600/document>.
4. Kovalenko, B., Kudin, A. Kleptography trapdoor free cryptographic protocols. (2018). *eprint.iacr.org*. <https://eprint.iacr.org/2018/989>.
5. Tkach, Yu., Shelest, M., Synenko, M., Petrenko, T. (2023). The history of kleptography and its place in information security. *Technical Sciences and Technology*, (3(33)), 150–161. <http://tst.stu.cn.ua/article/view/291215>.
6. Operation Rubikon. (2020). *www.zdf.de*. <https://www.zdf.de/politik/frontal/operation-rubikon-100.html>.

7. The NSA Tried This Before – What the 90s Debate Over The Clipper Chip Can Teach Us About Digital Privacy. (2014). www.internethistorypodcast.com. <https://www.internethistorypodcast.com/2014/08/the-nsa-tried-this-before-what-the-90s-debate-over-the-clipper-chip-can-teach-us-about-digital-privacy-debates/>.

8. The intelligence coup of the century. (2020). www.washingtonpost.com. <https://www.washingtonpost.com/graphics/2020/world/national-security/cia-crypto-encryption-machines-espionage/>.

Отримано 18.11.2024

UDC 004.4:056.57

Oleksandr Polevod

PhD Student of Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: oleksandr.polevod23@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0007-0885-8625>

KLEPTOGRAPHY IN INFORMATION SECURITY CONTEXT. CLASSIFICATION OF KLEPTOGRAPHIC ATTACKS

The increasing informatisation of society presents new challenges, as modern information technologies are used not only by regular users but also by individuals engaged in illegal activities, such as criminals, fraudsters, and terrorist groups. These technologies are being exploited for unlawful operations, which requires each state to maintain control over its segment of cyberspace.

The issue of exclusive access and control by specialised services over citizens' information activities is becoming increasingly important as the level of informatisation increases. A key challenge in this area is that kleptography, as a discipline that studies this field, is still in its early stages and is often applied in a rather narrow sense.

An analysis of existing works on this topic has shown that kleptography is still predominantly viewed in the context of cryptography, which provides a narrow and specific perspective on this discipline. The problem of identifying secret channels for information leakage needs to be considered beyond traditional cryptanalysis, as in the current era of widespread digitalization and informatization, attackers are finding increasingly sophisticated ways to carry out illegal information activities.

The purpose of this article is to present kleptography in a broader context than cryptography and to provide a classification of kleptographic attacks.

This study examines kleptography in the modern context, its tasks and challenges, and offers a classification of attacks based on hidden channels. The results show that kleptography has evolved from research focused on cryptographic backdoors to a broader understanding of information security threats. The primary idea of kleptographic attacks is to introduce vulnerabilities during the system's development or operation stages, using hidden channels to leak data. Kleptography encompasses not only cryptography but also hardware and software security, including side-channel attacks such as power consumption or timing analysis. Detecting such attacks is challenging and requires a comprehensive approach that integrates cryptanalysis, engineering, and analysis of physical system processes.

Keywords: *kleptography; cryptography; side-channel; classification; reverse engineering; information security.*

References: 8.

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-4(38)-214-221

УДК 678.029.5: 669

Олексій Юрійович Полоз¹, Юрій Рахмісевич Ебіч²

¹ кандидат технічних наук, докторант кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів Український державний університет науки і технологій. Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

E-mail: ua.apolo@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5577-3869>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6505811695>

² доктор хімічних наук, професор кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів Український державний університет науки і технологій. Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

E-mail: ua.apolo@gmail.com **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-7121-5573>

SCOPUS <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7801687360>

МЕТАЛОЕПОКСИДНІ КОМПОЗИЦІЇ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВУЛКАНІЗАЦІЙНИХ ПРЕС-ФОРМ

Розроблено металоепоксидну композицію для виробництва елементів вулканізаційних прес-форм при виготовленні нестандартних та малосерійних виробів із гуми та пластмас. Доведено ефективність використання бідисперсного порошку алюмінію у складі металоепоксидних композицій для виробництва вулканізаційних прес-форм. Здійснено виробничу перевірку та впровадження наповненої бідисперсним порошком алюмінію металоепоксидної композиції при виготовленні прес-форм для вулканізації гумових елементів футерування ґрунтових насосів на ТОВ «Нові технології» (м. Дніпро).

Ключові слова: металополімерні елементи прес-форм; металоепоксидні композиції; комбінації отверджувачів; порошок алюмінію; теплостійкість; міцність при стисненні.

Табл.: 2. Рис.: 2. Бібл.: 20.

Актуальність теми дослідження. Виробництво полімерних виробів конструкційного призначення забезпечується використанням не тільки відповідних полімерних композицій, а також якісних прес-форм. Традиційно прес-форми для виробництва таких виробів виготовляються товстостінними з високоякісних вартісних сталей конструкційного призначення [1-2]. Для малосерійного виробництва з асортиментом, що постійно змінюється залежно від кон'юнктури ринку, використання таких прес-форм є економічно не вигідним. У цих умовах доцільне застосування комбінованих прес-форм із використанням сучасних композиційних матеріалів на основі феноло-формальдегідних, епоксидних смол, акрилатів та ін. з додаванням металевих наповнювачів (залізо, алюміній та ін.) та їх оксидів [3-4]. При цьому використовується виготовлення промоделі, форми, заповнення її металополімерною композицією з витримкою в формі до затвердіння, вилучення готової моделі [5]. Набуває певного сенсу та актуальності зменшення собівартості прес-форм при виготовленні їхньої формуючої поверхні з металополімеру, а основний силовий елемент – простої геометричної форми з більш дешевої сталі Ст3 [6]. Композиційний матеріал має високу адгезію до металевого каркаса, забезпечує рівномірне передавання теплової енергії до гумової суміші при вулканізації, має необхідний термін експлуатації за температур (145-160 °С) вулканізації виробів та циклічних змінах температур при нагріванні та охолодженні прес-форм, високу ремонтпридатність.

Постановка проблеми. Збільшення випуску необхідних малосерійних та нестандартних виробів із гуми і пластмас стримується необхідністю застосування відповідних прес-форм із вартісних конструкційних сталей із необхідною складною металообробкою, що є певною проблемою при швидкому переналадженні дільниць із

виробництва такої продукції. У цих умовах необхідним та доцільним є застосування спрощеної конструкції прес-форм з металополімерними елементами необхідної теплостійкості та здатних витримувати значне стиснення при виготовленні виробів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення теплостійкості полімерних, зокрема епоксидних, композицій є одним із важливих напрямів покращення їхніх експлуатаційних властивостей [7] при вирішенні певних технічних задач і розширенні сфер використання виробів із них. Аналіз останніх опублікованих робіт показав, що покращення експлуатаційної витривалості прес-форм з елементами полімерних матеріалів відбувається у двох напрямках – використання більш прогресивної технології виготовлення із застосуванням відповідної їхньої конструкції та полімерних композицій удосконаленого складу і структури. При удосконаленні технології та конструкції прес-форм для виготовлення виробів із гуми і пластмас набуває застосування пошаровий синтез фізичної копії на основі 3D-CAD-моделі [8], при якому стереолітографічна модель використовується для виготовлення оснащення із силіконового каучуку як майстер-моделі. Ця технологія використовується для виготовлення дрібних партій виробів із пластмас, що заливаються безпосередньо в силіконову форму [9]. Однак при застосуванні цієї технології спостерігається порушення точності моделей унаслідок недостатньої жорсткості форми із силіконового каучуку та незначний ресурс роботоздатності прес-форм. Удосконалення полімерних композицій, зокрема епоксидних, досягається застосуванням відповідних отверджувачів, що забезпечують утворення більш щільної тривимірної сітки, та формуванням дисперсної структури наповнювачів (дисперсні метали та їх оксиди, металеві нанонаповнювачі) з підвищеною теплопровідністю [10-17]. Для підвищення теплостійкості епоксидних композицій унаслідок формування більш щільної тривимірної сітки використовуються комбінації кислотного ангідриду, що містить фенілетинілкарбонільну групу, та імідної сполуки з фенілетинілкарбонільною групою на обох кінцях [10]. Щільність тривимірної сітки збільшується за рахунок полімеризації за участю фенілетинілкарбонільних груп, а полієнова структура, що сформувалася, і внутрішньомолекулярний імідний скелет підсилюють міжмолекулярну взаємодію. Реакція отвердження цієї системи проводиться за високих температур, °C: I стадія за 150-170, II стадія – за 250-300. Використання ціанатного ефіру і поліедричних олігомерних силесквіоксанів дозволяє збільшити теплостійкість отвердженої епоксидної композиції до 250 °C [13]. Значне покращення експлуатаційних, у тому числі й теплостійкості, властивостей епоксидних композитів досягається введенням у наповнені епоксидні композиції різних модифікаторів епоксидних смол, зокрема, 2,4-діамінотолуену [14]. Взаємодією епоксидної смоли з амінованим кремнеземом одержують високонаповнені епоксидні композити зі збільшеною на 100 °C теплостійкістю [15]. Однак відзначені системи отвердження та модифікації епоксидних композицій при забезпеченні їхньої високої теплостійкості є вартісними й малодоступними для широкого використання. Певна увага приділяється впливу розміру частинок і концентрації наповнювачів на властивості композитів [17]. При цьому в більшості публікацій поза увагою залишаються питання більш доступного покращення теплостійкості епоксидних композитів за рахунок підвищення щільності пакування металевих наповнювачів, що вводяться в них. Таким чином, формування щільно упакованої дисперсної структури наповнювачів дозволить підвищити теплостійкість та термін експлуатації металоепоксидних прес-форм.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх опублікованих досліджень показав їх недостатню кількість унаслідок нерозповсюдження досягнутих певних результатів із підвищення експлуатаційних властивостей, зокрема, теплостійкості, епоксидних композицій, що становлять ноу-хау

провідних світових фірм (Loctite, Belzona та ін.). Одним із можливих доступних напрямів покращення теплостійкості епоксидних композицій і виробів із них є раціональне поєднання металевих наповнювачів різного ступеня дисперсності для забезпечення необхідних технологічних та експлуатаційних властивостей.

Метою статті є створення металоепоксидних композицій із підвищеною теплостійкістю та міцністю при стисненні для виготовлення елементів вулканізаційних прес-форм із застосуванням комбінацій отверджуючих агентів та дисперсного порошку алюмінію з підвищеною щільністю пакування частинок.

Виклад основного матеріалу. При проведенні досліджень металоепоксидні композиції виготовляли шляхом механічного змішування епоксидної діанової смоли CHS-Ероху 525 виробництва фірми Spolchemie, Чехія (епоксидний еквівалент 179-189 г/екв, динамічна в'язкість при 25°C 10-12 Па·с) та отверджувачів Poly7 виробництва фірми Tosoh Corporation, Японія (склад: поліетиленполіамін – 60-80 мас.%, пентаетиленгексамін – 10-30 мас. %, тетраетиленпентамін – 9 мас. %, амінне число 1200-1280 мг КОН/г) або модифікованого аліфатичного поліаміна Telalit 0343 виробництва фірми Spolchemie, Чехія (динамічна в'язкість при 25°C 0,8 Па·с, амінне число 1000 мг КОН/г) у комбінації з триетаноламініотитанатом TUZOR TEP виробництва фірми Dorf Ketal, США (динамічна в'язкість при 25°C 2800 мПа·с, вміст титану в перерахунку на TiO₂ не менше 13,8 мас. %) протягом 3-5 хв з наступним додаванням порошку алюмінію (ТУ 48-5-152-78) з розмірами частинок 240-450 мкм у кількості 200 мас.ч. на 100 мас.ч. смоли (монодисперсний) або 160-240 мкм у кількості 100 мас.ч. на 100 мас.ч. смоли + 240-450 мкм у кількості 200 мас.ч. на 100 мас.ч. смоли (бідисперсний) та змішуванням протягом 5-6 хв до отримання однорідної маси. З металоепоксидної композиції виготовляли стандартні зразки, які отверджували за попередньо встановленими оптимальними режимами: I стадія - 20°C×48 год, II стадія - 80°C×3 год + 100°C×3 год + 120°C×4 год для композицій з монодисперсним порошком алюмінію або: I стадія - 20°C×48 год, II стадія - 60°C×2 год + 100°C×3 год + 130°C×3 год для композицій із бідисперсним порошком алюмінію. Застосування бідисперсного порошку алюмінію відповідно до закономірностей формування дисперсних систем [18] дозволяє створити більш рівнощільнену структуру наповнювача в композиції внаслідок заповнення простору більш дрібними частинками між структурними пустотами більш крупнодисперсного.

Вибір епоксидної діанової смоли CHS-Ероху 525 зумовлений високими фізико-механічними властивостями композиційних матеріалів на основі діанових епоксидних смол, можливістю їх отвердження за звичайної температури (20 °C) без застосування енергоносіїв. Застосування поліаміну Poly7 у кількості 5 мас.ч. на 100 мас.ч. смоли (або Telalit 0343 у кількості 9 мас.ч. на 100 мас.ч. смоли) дозволяє проводити основний процес отвердження при 20 °C (20°C×48 год), необхідний для формування металоепоксидної складової прес-форми з достатньою міцністю для можливості вилучення з неї майстер-моделі, а для повного перебігу процесу отвердження та отримання необхідних експлуатаційних властивостей прес-форм за участю триетаноламініотитанату TUZOR TEP (у кількості 6 мас.ч. на 100 мас.ч. смоли) застосовували II стадію отвердження.

Фізико-механічні характеристики металоепоксидних композицій визначали після I та II стадій отвердження відповідно до діючих стандартів. Визначення життєздатності наповнених композицій, яка становила не менше 1 год за температури 20 °C, проводили для встановлення можливості формування металоепоксидної складової прес-форми.

На рис. 1 представлено вплив застосованих комбінацій отверджувачів на зміну міцності при розтягуванні як найбільш чутливої характеристики до сформованої тривимірної сітки композицій, наповнених 200 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли монодисперсним порошком алюмінію з розмірами частинок 240-450 мкм, за різних температур у промисловій

будівлі залежно від часу їх витримки при цих температурах. Наведені дані свідчать про необхідність коригування режиму отвердження металепоксидних композицій шляхом збільшення часу I стадії процесу при температурі 15 °С, як було встановлено, до 96 год для досягнення потрібної міцності при вилученні майстер-моделі із прес-форми.

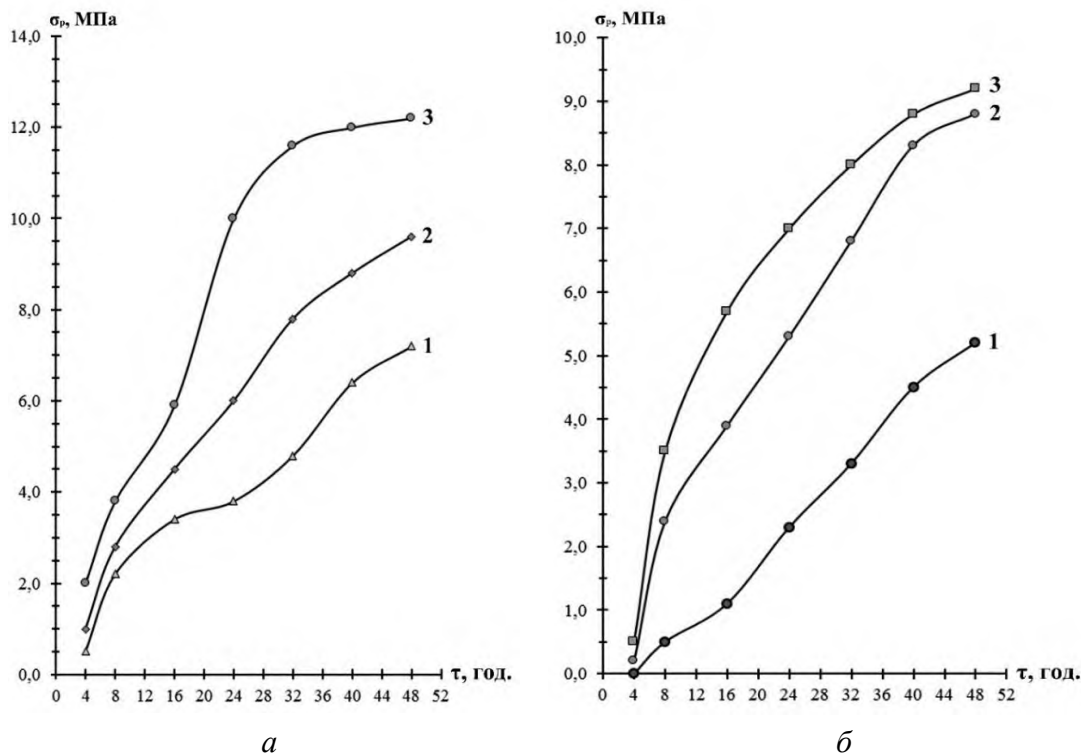


Рис. 1. Вплив температури першої стадії отвердження епоксидних композицій, наповнених 200 мас.ч. монодисперсним порошком алюмінію з розмірами частинок 240-450 мкм, на зміну їхньої міцності при розтягуванні σ_p з отверджувачами:

а – Telalit 0343 + TUZOR TEP; б – Poly7 + TUZOR TEP

Температури отвердження, °С: 1 – 15; 2 – 20; 3 – 30

Джерело: розроблено авторами.

Дані табл. 1 ілюструють зміну основних експлуатаційних характеристик металепоксидних композицій, наповнених монодисперсним порошком алюмінію з розмірами частинок 240-450 мкм, залежно від вмісту наповнювача та застосованих комбінацій отверджувачів. Наведені дані доводять перевагу застосування комбінації отверджувачів Telalit 0343 + TUZOR TEP при отвердженні металепоксидних композицій.

Таблиця 1 – Вплив вмісту монодисперсного порошку алюмінію та комбінацій отверджувачів на властивості металепоксидних композицій (режим отвердження: 20°С × 48 год + 80°С × 3 год + 100°С × 3 год + 120°С × 4 год)

Вміст монодисперсного порошку алюмінію, мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли	Отверджувачі			
	Poly7 + TUZOR TEP		Telalit 0343 + TUZOR TEP	
	міцність при стисненні, МПа	теплостійкість за Мартенсом, °С	міцність при стисненні, МПа	теплостійкість за Мартенсом, °С
0	140	98	148	105
50	120	101	135	109
100	108	103	122	115
200	106	105	115	120

Джерело: розроблено авторами.

Більший ефект підвищення теплостійкості та міцності при стисненні металепоксидних композицій спостерігається при застосуванні, як і очікувалось, бідисперсного порошку алюмінію (табл. 2) та комбінації отверджувачів Telalit 0343 + TUZOR TER. Слід зазначити, що теплостійкість наповнених бідисперсним порошком алюмінію металепоксидних композицій при проведенні процесу вулканізації гумових виробів за температур 140-160°C збільшується на ~ 50 °С від визначеної за стандартним методом [19-20], оскільки при дії навантаження стиснення температурна межа експлуатації (при інших рівних умовах) буде вище, ніж при дії навантаження вигинання при застосуванні стандартного методу визначення теплостійкості за Мартенсом, і становить ~ 180 °С.

Таблиця 2 – Вплив вмісту бідисперсного порошку алюмінію та комбінацій отверджувачів на властивості металепоксидних композицій (режим отвердження: 20°C × 48 год + 60°C × 2 год + 100°C × 3 год + 130°C × 3 год)

Вміст бідисперсного порошку алюмінію, мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли	Отверджувачі			
	Poly7 + TUZOR TER		Telalit 0343 + TUZOR TER	
	міцність при стисненні, МПа	теплостійкість за Мартенсом, °С	міцність при стисненні, МПа	теплостійкість за Мартенсом, °С
100	116	105	135	121
200	112	108	129	127
300	108	116	125	133

Джерело: розроблено авторами.

Розроблена металепоксидна композиція на основі епоксидної діанової смоли CHS-Ероху 525 з додаванням 300 мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидної смоли бідисперсного порошку алюмінію при отвердженні комбінацією отверджувачів Telalit 0343 + TUZOR TER пройшла виробничу перевірку і впроваджена при виготовленні прес-форм для вулканізації гумових елементів футерування ґрунтових насосів на ТОВ «Нові технології» (м. Дніпро). На рис. 2 представлено загальний вид металепоксидної прес-форми та виготовленого в ній гумового елемента футерування ґрунтового насоса.

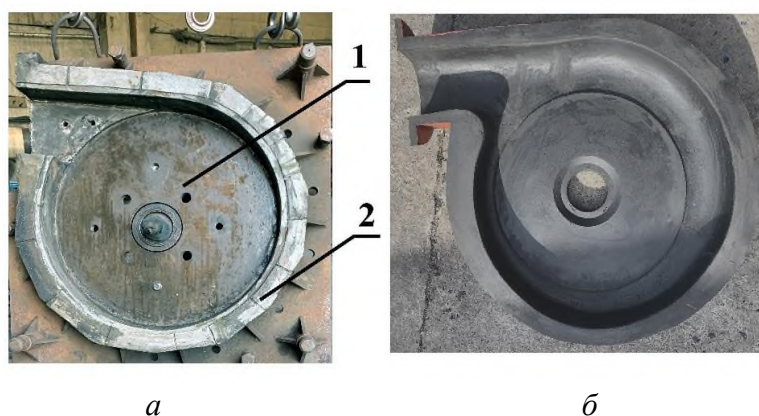


Рис. 2. Загальний вид нижньої частини металепоксидної прес-форми (а) та виготовленого в ній гумового елемента футерування ґрунтового насоса (б):

1 – сталевий (Ст3) елемент; 2 – металепоксидний елемент

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Установлено вплив температур в промисловому приміщенні (15-30 °С) на перебіг отвердження комбінаціями отверджувачів Poly7 (Telalit 0343) + TUZOR TER наповнених порошком алюмінію епоксидних композицій і з'ясовано необхідність збільшення терміну їх отвердження за температури 15 °С на 48 год порівняно з рекомендованим за температури 20 °С.

Доведено ефективність використання бідисперсного порошку алюмінію у складі металоєпоксидних композицій для виробництва вулканізаційних прес-форм.

Здійснено виробничу перевірку і впровадження наповненої бідисперсним порошком алюмінію металоєпоксидної композиції з її отвердженням комбінацією отверджувачів Telalit 0343 + TUZOR TEP при виготовленні прес-форм для вулканізації гумових елементів футерування ґрунтових насосів на ТОВ «Нові технології» (м. Дніпро).

Список використаних джерел

1. Rosato Dominick V. Injection Molding Handbook / Dominick V. Rosato, Donald V. Rosato, Marlene G. Rosato. – 3-rd ed. – Kluwer Academic Publishers, 2000. – 1457 p.
2. Gianni A. Coscia. Handbook for the use of rubber injection molding machines / Coscia A. Gianni. – La Tipografica Varese, 1998. – 190 p.
3. Натансон Э. М. Коллоидные металлы и металлополимеры / Э. М. Натансон, З. Р. Ульберг. – Киев : Наукова думка, 1971. – 348 с.
4. Натансон Э. М. Металлополимеры / Э. М. Натансон, М. Т. Брык // Успехи химии. – 1972. – Т. 41. – № 8. – С. 1465-1493.
5. Балабин В. В. Модельное производство / В. В. Балабин. – Москва : Машиностроение, 1970. – 157 с.
6. Патент на корисну модель №155931 (UA) Україна. C08J 5/00, C08G 59/00, C08G 59/22, C08K 3/00, C08K 3/10. Спосіб виготовлення металополімерної композиції для виробництва вулканізаційних прес-форм / Полоз О. Ю., Ебіч Ю. Р.; заявник і власник Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет». – №u 2023 05288; заявл. 07.11.2023; опубл. 17.04.2024; Бюл. № 16. – 4 с.
7. Epoxy polymers: new materials and innovations / Edited by J. R. Pascault and J. J. Williams. – WileyYCH, 2010. – 367 p.
8. Зеленко М. Технологии быстрого прототипирования – послойный синтез физической копии на основе 3D-CAD-модели / М. Зеленко // CAD/CAM/CAE Observer. – 2003. - № 2. – С. 2-9.
9. Піднебесний А. П. Силоксанові гуми та їх властивості / А. П. Піднебесний, Л. О. Мельник, Н. В. Савельєва. – Київ: Фітосоціоцентр, 2006. – 320 с.
10. Kimura Hajime. Epoxy resins with high heat resistance and flame retardancy via a new process / Hajime Kimura, Keiko Ohtsuka, Morio Yonekawa // Polymers for Advanced Technologies. – 2021. – Vol.32. – Issue2. – Pp. 474-483. DOI: <https://doi.org/10.1002/pat.5100>.
11. Иванова Л. А. Металлополимерные композиции для восстановления зерноперерабатывающего оборудования: монография / Л. А. Иванова, С. В. Котлик, М. Б. Гараев. – Одесса : Астропринт, 2012. – 108 с.
12. Improving the Heat Resistance and Flame Retardancy of Epoxy Resin Composites by Novel Multifunctional Cyclophosphazene Derivatives / Wangxi Fan, Zefang Li, Qin Liao [et al.] // Polymers. – 2023. – Vol.15. – Issue 59. – Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15010059>.
13. High heat-resistant (250°C) epoxy resin composites with excellent dielectric properties / Chunbiao Wang, Yu Feng, Changhai Zhang et al. // Journal of Applied Polymer Science. – 2022. – Vol. 139. – Issue 40. – Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.52963>.
14. Теплофізичні властивості модифікованих 2,4-діамінотолуеном епоксидних матриць / С. О. Сметанкін, Д. П. Стухляк, В. М. Яцюк, В. С. Барановський // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2018. – № 2 (65). – С. 41-55.
15. Малахова І. В. Умови одержання високонаповнених епоксидних композицій з покращеними термомеханічними властивостями / І. В. Малахова // Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія Хімія. – 2008. – Вип. VI. – С. 74-77.
16. Букетов А. В. Епоксидні наноккомпозити: монографія / А. В. Букетов, О. О. Сапронов, В. Л. Алексенко. – Херсон : ХДМА, 2015. – 184 с.
17. Мартинюк Г. В. Наповнені епоксидні компаунди: фізико-хімічні властивості: монографія / Г. В. Мартинюк. – Рівне : О. Зень, 2016. – 131 с.
18. Design of Concrete Mix Proportion Based on Particle Packing Voidage and Test Research on Compressive Strength and Elastic Modulus of Concrete / Yun-Hong Cheng, Bao-Long Zhu, Si-Hui Yang, Bai-Qiang Tong // Materials. – 2021. – Vol. 14. – Issue 3. – Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14030623>.

19. Термопласты конструкционного назначения / под ред. Е. Б. Тростянской. – Москва : Химия, 1975. – 240 с.

20. Пластики конструкционного назначения (реактопласты) / П. Г. Бабаевский [и др.] ; ред. Е. Б. Тростянская. – Москва : Химия, 1974. – 304 с.

References

1. Rosato, D. V., Rosato, D. V., & Rosato, M. G. (2000). *Injection Molding Handbook*. 3-rd ed. Kluwer Academic Publishers.

2. Gianni, A. C. (1998). *Handbook for the use of rubber injection molding machines*. La Tipografica Varese.

3. Nathanson, E. M., Ulberg, Z. R. (1971). *Kolloidnyye metally i metallopolimery* [Colloidal metals and metallopolymers]. Naukova dumka.

4. Nathanson, E. M., Bryk M. T. (1972). Metallopolimery [Metal-polymers]. *Uspekhi khimii*, 41(8), 1465-1493.

5. Balabin, V. V. (1970). *Modelnoye proizvodstvo* [Model production]. Mashinostroyeniye.

6. Poloz, O. Yu., Ebich, Yu. R. (2024). *Sposib vyhotovlennya metalopolimernoyi kompozytsiyi dlya vyrobnytstva vulkanizatsiynykh pres-form (Ukrainskyi deklaratsiynyi patent na vynakhid No 155931 A) [The method of manufacturing a metal-polymer composition for the production of vulcanization molds (Ukrainian declaratory patent for the invention No. №155931 A)]*. Ministry of Education and Science of Ukraine, State Department of Intellectual Property.

7. Pascault, J. R., & Williams, J. J. (Ed.) (2010). *Epoxy polymers: new materials and innovations*. WileyYCH.

8. Zelenko, M. (2003). Tekhnologii bystrogo prototipirovaniya – posloynnyy sintez fizicheskoy kopii na osnove 3D-CAD-modeli [Rapid prototyping technologies – layer-by-layer synthesis of a physical copy based on a 3D-CAD-model]. *CAD/SAM/SAYe Observer*, (2), 2-9.

9. Pidnebesnyy, A. P. (2006). *Syloksanovi humy ta yikh vlastyvosti* [Siloxane rubbers and their properties]. Fitosotsiotsentr.

10. Kimura, H., Ohtsuka, K., & Yonekawa, M. (2021). Epoxy resins with high heat resistance and flame retardancy via a new process. *Polymers for Advanced Technologies*, 32(2), 474-483. <https://doi.org/10.1002/pat.5100>

11. Ivanova, L. A. (2012). *Metallopolimernyye kompozitsii dlya vosstanovleniya zernopererabatyvayushchego oborudovaniya: monografiya* [Metal-polymer compositions for the restoration of grain processing equipment: monograph]. Astroprint.

12. Wangxi, F., Zefang, L., Qin, L., Lintong, Z., Longjie, K., Zhou, Y., & Meng, X. (2023). Improving the Heat Resistance and Flame Retardancy of Epoxy Resin Composites by Novel Multifunctional Cyclophosphazene Derivatives. *Polymers*, 15(59), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15010059>

13. Wang, C., Feng, Y., Zhang, C., Zhang, T., Chi, Q., Chen, Q., & Lei, Q. (2022). High heat-resistant (250°C) epoxy resin composites with excellent dielectric properties. *Journal of Applied Polymer Science*, (139 (40)), 1-10. <https://doi.org/10.1002/app.52963>

14. Smetankin, S. O., Stukhlyak, D. P., Yatsyuk, V. M., & Baranovsky, V. S. (2018). Teplofizychni vlastyvosti modyfikovanykh 2,4-diaminotoluenom epoksydnykh matryts [Thermophysical properties of epoxy matrices modified with 2,4-diaminotoluene]. *Visnyk Kherson's'koho natsional'noho tekhnichnoho unyversytetu*, 2(65), 41-55.

15. Malakhova, I. V. (2008). Umovy oderzhannya vysokonapovnenykh epoksydnykh kompozytsiy z pokrashchenymy termomekhanichnymy vlastyvostyamy [Conditions for obtaining highly filled epoxy compositions with improved thermomechanical properties]. *Visnyk Prykarpats'koho natsional'noho unyversytetu imeni Vasylya Stefanyka. Seriya Khimiya*, VI, 74-77.

16. Buketov, A. V., Saponov, O. O., & Aleksenko, V. L. (2015). *Epoksidni nanokompoziti: monografiya* [Epoxy nanocomposites: monograph]. KHDMA.

17. Martyniuk, G. V. (2016). *Napovneni epoksydni kompaundy: fizyko-khimichni vlastyvosti: monohrafiya* [Filled epoxy compounds: physical and chemical properties: monograph]. O. Zen'.

18. Cheng, Yun-Hong, Zhu, Bao-Long, Yang, Si-Hui, & Tong Bai-Qiang. (2021). Design of Concrete Mix Proportion Based on Particle Packing Voidage and Test Research on Compressive Strength and Elastic Modulus of Concrete. *Materials*, 14(3), 1-17. <https://doi.org/10.3390/ma14030623>

19. Trostyanskaya, Ye. B. (Ed.) (1975). *Termoplasty konstruktsionnogo naznacheniya* [Thermoplastics for structural purposes]. Khimiya.

20. Trostyanskaya, Ye. B. (Ed.) (1974). *Plastiki konstruktsionnogo naznacheniya (reaktoplasty)* [Plastics for structural purposes (thermosets)]. Khimiya.

Отримано 02.11.2024

UDC 678.029.5: 669

Oleksii Poloz¹ Yuriy Ebich²,

¹PhD in Technical Sciences, Doctoral Candidate of the Department of Fuel, Polymer and Polygraphic Materials Technologies Ukrainian State University of Science and Technologies. Educational and Scientific Institute "

Ukrainian State University of Chemical Technology" (Dnipro, Ukraine)

E-mail: ua.apolo@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-5577-3869>

SCOPUS <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6505811695>

²Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Fuel, Polymer and Polygraphic Materials Technologies Ukrainian State University of Science and Technologies. Educational and Scientific Institute

"Ukrainian State University of Chemical Technology" (Dnipro, Ukraine)

E-mail: ua.apolo@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-7121-5573>

SCOPUS <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7801687360>

METAL EPOXY COMPOSITE FOR THE PRODUCTION OF VULCANIZING PRESS-MOLDS

Increasing the output of necessary low-volume and non-standard products made of rubber and plastics is urgent, but it is restrained by the need to use appropriate molds made of valuable structural steels with the necessary complex metal processing, which is a certain problem during the rapid restructuring of production sites for such products. In these conditions, it is advisable to use a simplified design of molds with metal-polymer (metal-epoxy) elements of the necessary heat resistance and able to withstand significant compression during the manufacture of products.

The analysis of research and publications on the development and implementation of metal-epoxy elements of molds showed that insufficient attention is paid to the issues of developing the composition of compositions for producing such elements and improving their operational properties.

The purpose of the article is to create metal-epoxy compositions with increased heat resistance and compressive strength for the manufacture of vulcanization mold elements using combinations of curing agents and dispersed aluminum powder with increased particle packing density.

The influence of temperatures in the industrial premises (15-30°C) on the course of curing with combinations of hardeners Poly7 (Telalit 0343) + TUZOR TEP of epoxy compositions filled with aluminum powder was determined, and the need to increase their curing time at a temperature of 15°C by 48 hours was determined. Compared to the recommended temperature of 20°C.

The effectiveness of using bidisperse aluminum powder as part of metal epoxy compositions for producing vulcanization molds has been proven.

A production check and introduction of a metal-epoxy composition filled with bidisperse aluminum powder was carried out with its hardening with a combination of hardeners Telalit 0343 + TUZOR TEP in the manufacture of molds for vulcanization of rubber lining elements of ground pumps at "New Technologies" LTD (Dnipro).

Keywords: metal-polymer elements of press-molds; metal-epoxy compositions; combinations of hardeners; aluminum powder; heat resistance; compressive strength.

Table: 2. Fig: 2. References: 20.

Раїса Миколаївна Волкова

старший викладач кафедри харчових технологій та екології

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: volkova6402@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6339-8461>. ResearcherID: [EFH-1860-2022](https://orcid.org/EFH-1860-2022)**ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ КОНСЕРВОВАНОЇ ІКРИ З КАБАЧКІВ ІЗ ДОДАВАННЯМ ЧЕРВОНОГО БОЛГАРСЬКОГО ПЕРЦЮ**

Проаналізовано сучасний асортимент овочевих консервів, що виробляють вітчизняні підприємства. Визначено частку консервів «Ікра з кабачків» у загальному обсязі випуску овочевих консервів. Визначено харчову та енергетичну цінність, органолептичні та фізико-хімічні показники якості консервованої ікри з кабачків із додаванням червоного болгарського перцю.

Ключові слова: овочеві консерви; харчова та енергетична цінність; показники якості консервованої ікри з кабачків із додаванням червоного болгарського перцю.

Табл.: 5. Рис.: 4. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Виробництво овочевих консервів в Україні традиційно займає значну частку в загальному обсязі консервованої плодово-овочевої продукції. Компанією Pro-Consulting були проаналізовані основні чинники, що вплинули на виробництво вітчизняної консервованої овочевої продукції за останні роки [1]:

- зменшення чисельності споживачів та зниження їхньої купівельної спроможності;
- зростання обсягів споживання продукції тривалого терміну зберігання;
- зростання цін на тару й пакування (скло і пластик), що призвело до збільшення собівартості консервованої продукції;

- пошук нових смаків та поява нових інноваційних консервованих продуктів;

- популярність місцевих виробників консервованої продукції.

На рис. 1 наведена інформація щодо структури продажів овочевих консервів за каналами збуту [1].

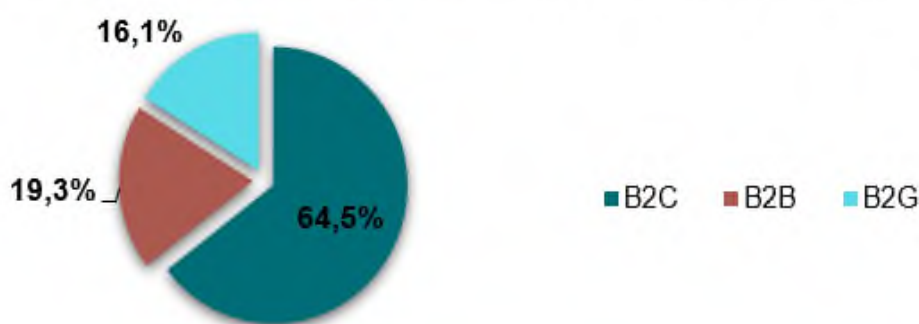
Структура продажів овочевої консервації по каналах, %

Рис. 1. Структура продажів овочевої консервації по каналах збуту у 2023 р.:

B2C – продаж споживачам у підприємствах торгівлі, рестораних закладах;

B2B – продаж підприємствам, компаніям, іншим організаціям;

B2G – продаж державним підприємствам через тендери

Джерело: <https://pro-consulting.ua>.

З рис. 1 видно, що найбільша частка продажів овочевих консервів (64,5 %) припадає на купівлю споживачами в підприємствах торгівлі, або [1].

Результати аналізу попиту споживачів на консервовану овочеву продукцію вітчизняних і закордонних виробників, яку вони купували в популярних українських мережах показано на рис. 2 [2].

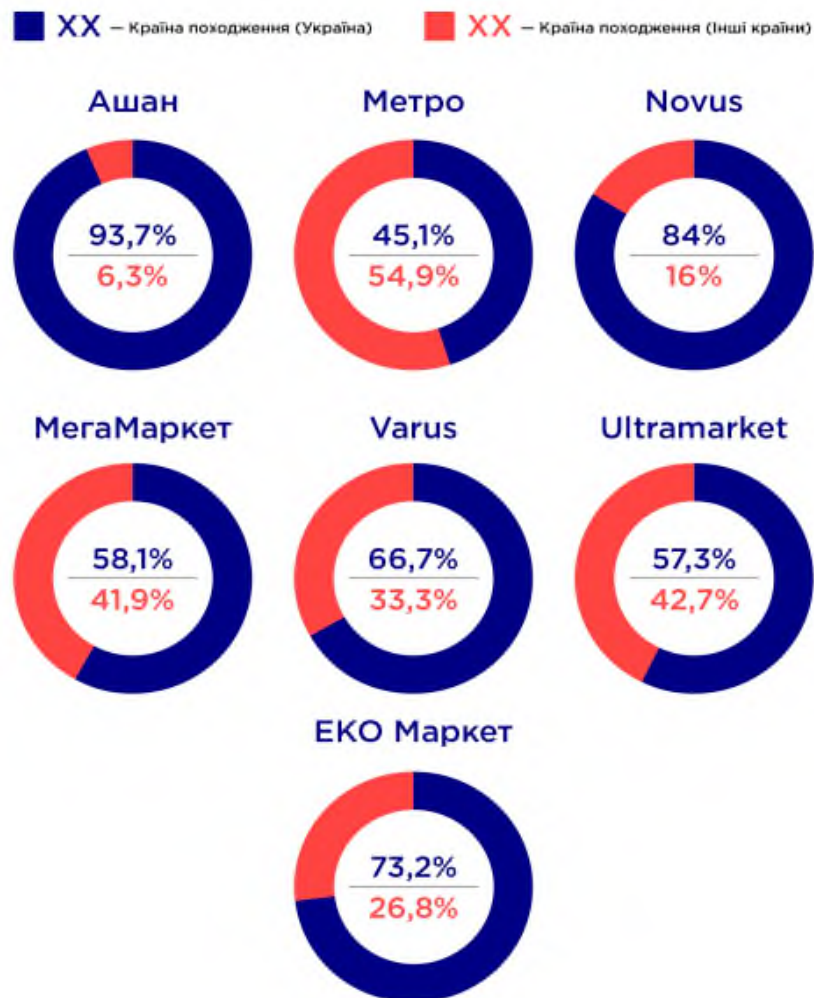


Рис. 2. Розподіл попиту споживачів на консервовану овочеву продукцію вітчизняних та закордонних виробників у популярних мережах українських супермаркетів у червні 2023 р.
Джерело: Delo.ua.

Аналізуючи інформацію з рис. 2, встановили, що в усіх популярних українських мережах супермаркетів найбільша частка попиту споживачів припадає на продукцію вітчизняних виробників консервованої овочевої продукції. Вітчизняні споживачі віддають перевагу якості й безпечності вітчизняної консервної продукції, відомим українським брендам, складу і смаковим особливостям овочевих консервів. Для вітчизняних переробних підприємств головним завданням є збереження харчової цінності, корисних властивостей, безпечності та якості сільськогосподарської сировини з найменшими втратами.

Виробництво консервованої овочевої продукції дозволяє збалансувати харчування населення в осінньо-зимовий період, коли найбільше відчувається нестача вітамінів та мінеральних речовин, урізноманітнити раціон споживачів.

У зв'язку з воєнним станом і постійною небезпекою багато виробничих підприємств перенесли свої потужності в західні регіони України та налагодили виробництво овочевих консервів. На цих підприємствах виробляють продукцію для постачання у військові частини для збагачення раціону військовослужбовців, на внутрішній ринок, забезпечують консервованою овочевою продукцією державні установи (лікарні, дитячі будинки, будинки пристарілих тощо). Консервування овочевої сировини дозволяє створювати великі запаси, що можуть споживатися протягом року до нового врожаю.

Дослідження, що проводяться вітчизняними і закордонними вченими, спрямовані на:

- вдосконалення технологій консервування овочевої сировини;
- збереження її харчової цінності, унікального хімічного складу;
- оптимізацію складу класичних видів консервованої овочевої продукції;
- застосування нових, нетрадиційних видів сировини для збагачення складу овочевих консервів.

Постановка проблеми. Овочеві консерви є традиційною продукцією не тільки промислових підприємств України, але й домашніх господарств. Поряд з цим, консервована овочева продукція відомих українських виробників і, зокрема, ікра з кабачків, завжди має високий попит у споживачів (табл. 1) [3].

Таблиця 1 – Вітчизняні підприємства-лідери з виробництва консервів овочевих «Ікра з кабачків»

№ з/п	Виробник	Найменування торгової марки	Асортимент консервів овочевих «Ікра з кабачків»
1.	ТОВ «ВЕРЕС», Рівненська область	«ВЕРЕС»	«Ікра з кабачків», «Ікра з кабачків «Екстра», «Ікра з кабачків з перчиком»
2.	ТОВ Плодоовочевий комбінат «Херсон»	«ХУТОРОК»	«Ікра з кабачків», «Ікра з кабачків «Літня»
3.	Одеський консервний завод	«ГОСПОДАРОЧКА»	«Ікра з кабачків», «Ікра з кабачків «Літня»
4.	ПП «Агроспецпроект»	«БАБУСИН ПРОДУКТ»	«Ікра з кабачків», «Ікра з кабачків «Літня»
5.	Ніжинський консервний завод, Чернігівська область	«НІЖИН»	«Ікра з кабачків»

Саме в овочевій консервованій продукції найкраще зберігаються всі корисні властивості свіжої сировини протягом тривалого часу. Овочева сировина не потребує складних технологічних операцій та обладнання і є сьогодні найдоступнішою для переробки вітчизняними виробничими підприємствами.

Відмінною особливістю овочевої консервованої продукції є збереження та покращення її смакових та органолептичних властивостей у результаті перероблення.

Сьогодні є багато способів консервування овочевої сировини. Згідно з ДСТУ 2073:2009, розділу 4, п. п. 4.8, регламентовані такі способи консервування овочів і фруктів [4]:

Теплове оброблення харчових продуктів

1. Стерилізування – теплове оброблення харчових продуктів за температури 100 °С та вище протягом часу, достатнього для знедіяння (інактивації) спорової мікрофлоризбудників псування та харчових отруєнь, яка забезпечує якість і стабільність продуктів у процесі їх зберігання.

2. Пастеризування - теплове оброблення харчових продуктів за температури не вище 100 °С протягом часу, достатнього для знедіяння (інактивації) неспоривих бактерій дріжджів і плісняви, яка забезпечує якість і стабільність продуктів у процесі їх зберігання.

3. Асептичне консервування – високотемпературне короткочасне теплове оброблення харчових продуктів у потоці, охолодження, фасування в асептичних умовах у стерильну тару.

4. Тиндалізація – неодноразове теплове оброблення консервів з охолодженням після кожного теплового оброблення та витримування протягом певного часу.

5. Субстерилізування - термічне оброблення напівконсервів, яке спричиняє загибель неспорутворювальної мікрофлори, а також зменшення кількості споривих мікроорганізмів до рівня, який гарантує запобігання псуванню продуктів за визначених умов зберігання.

6. Гаряче фасування (розливання) – термічне оброблення кислотних продуктів до фасування в тару, негайне фасування, закупорювання, витримування за температури фасування протягом часу, достатнього до одержання промислово стерильних консервів.

7. Квашення; соління; мочіння – мікробіологічний спосіб консервування, який ґрунтується на здатності молочнокислих бактерій зброджувати цукри, що містяться в овочах і фруктах, у молочну кислоту.

8. Засолювання – спосіб консервування овочів і пряної зелені кухонною сіллю чи її розчинами, концентрація яких запобігає молочнокислому бродінню.

9. Висушування – усування вологи з овочевої та/або фруктової сировини до залишкового вмісту, який ускладнює чи унеможлиблює життєдіяльність мікроорганізмів – специфічних збудників псування різних видів продуктів.

10. Заморожування – спосіб консервування продуктів, який ґрунтується на зменшенні температури овочевої та/або фруктової сировини нижче криоскопічної точки, за якої вся волога переходить у кристалічний стан.

Хімічне консервування

1. Сульфитація; обкурювання – оброблення овочевої та/або фруктової сировини, соку, пюре, сірчистим ангідридом, розчинами сірчистої кислоти або її солей, концентрація яких запобігає мікробіальному псуванню продукту.

2. Застосування консервантів – спосіб консервування овочевих та/або фруктових продуктів з використанням харчових добавок, концентрація яких нешкідлива для організму людини, що спрямовані на пригніченість мікроорганізмів-збудників псування, і які забезпечують якість консервів протягом усього строку зберігання.

Більшість овочевих консервів виробляється із застосуванням оцтової кислоти, яка пригнічує життєдіяльність мікрофлори. Термін придатності таких консервів збільшується, але дія на овочеву сировину оцтової кислоти і високої температури при стерилізації, негативно впливає на компоненти складу овочів, а деякі з вітамінів і мікроелементів знищуються.

Отже, важливим завданням є розробка таких технологій консервування, які б забезпечували збереження цінного хімічного складу овочевої сировини й одночасно захищали продукцію від псування протягом гарантованого виробником терміну зберігання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні переробка овочевої сировини посідає провідне місце серед технологій агропереробних господарств, оскільки саме овочева сировина є найдешевшою і найдоступнішою для перероблення і реалізації.

Дослідження вітчизняних та закордонних учених: Р. Ю. Павлюк, Н. В. Воєводи, В. С. Іванченкова, Н. В. Дуденко, В. С. Ольховської, Г. О. Сімахіної, М. Kumar, К. Komerford, S. R. Miller, W. A. Knudson та інших, спрямовані на пошук нових видів сировини і технологій у галузі створення консервованої овочевої продукції з новими властивостями (лікувально-профілактичними, оздоровчими тощо).

Цікаву розробку математичної моделі овочевих консервів із завданими споживними властивостями, представили науковці Харківського державного університету харчування і торгівлі Н. В. Дуденко і В. С. Ольховська. За результатами проведених науковцями досліджень було підтверджено, методом математичного моделювання, раціональний склад рецептурних компонентів овочевої ікри підвищеної харчової цінності. До складу кабачкової ікри ввели нетрадиційну сировину: пюре з шипшини, пряно-ароматичну сировину – імбир та рапсову олію. Узагальнення інформації щодо сучасних принципів проектування складу багатокомпонентних рецептур із заданим комплексом показників харчової і біологічної цінності дало змогу обґрунтувати доцільність подальших досліджень, що спрямовані на удосконалення методів оцінювання харчової цінності харчових продуктів [5].

Науковці з Херсонського державного аграрно-економічного університету запропонували заміну класичної технології виробництва консервованої овочевої ікри способом обжарювання сировини у паромасляній печі, на бланшування паром та

водою, що дозволяє отримати новий оздоровчий продукт для споживачів з порушенням функціонування шлунково-кишкового тракту та печінки. Також була оптимізована рецептура овочевої баклажанної ікри, до складу якої додавали пюре з гарбуза та чорнослив [6].

Аналізуючи напрями досліджень зарубіжних науковців у галузі консервування овочевої продукції, визначено, що основними питаннями в цих розробках є пошук нових методів консервування з метою найефективнішого збереження сировини, зменшення відходів у технологічному процесі й забезпеченні збереження безпечності і якості готової продукції.

Пошуком нових методів консервування та їх впровадженням у виробництво: розробка нанотехнологій; застосування озону; комбінації методів, наприклад, термічного й електричного; методи, які можна застосовувати замість пастеризації і стерилізації: обробка під високим тиском (ННР); застосування імпульсних електричних полів (PEF), обробка ультразвуком; імпульсне опромінювання (PL), ультрафіолетове опромінювання (UV), обробка холодною плазмою (CP), активно займаються науковці з Індії [7]. Також були досліджені важливі напрями збереження і консервування овочевої продукції: зберігання в контрольованій атмосфері (CA) і упакування в модифікованій атмосфері (MAP); обробка продукції альтернативними газовими сумішами; дослідження застосування у консервуванні їстівних пакувальних матеріалів; включення в пакувальні матеріали антимікробних сполук [8].

Науковці зі США та Великобританії провели дослідження сучасного стану взаємодії наукових організацій із промисловими підприємствами за допомогою Північноамериканської промислової системи NAICS. Охарактеризували здобутки щодо сучасних методів консервування овочевої сировини: термічних, сушіння та їх вплив на якість готової продукції [9].

Дослідженню впливу різних методів консервування на овочеву сировину, присвячені розробки науковців з Іспанії [10], зокрема, досліджували як технологічні процеси впливають на вміст поживних речовин і біологічно активних сполук у консервованій овочевій продукції. Науковці дослідили та проаналізували вплив термічних способів консервування на біоактивність та біодоступність більшості корисних для здоров'я речовин, що містяться у складі овочевої сировини. Було розглянуто вплив добавок, що використовуються в процесі консервування овочів, на збереження в них поживних речовин і вітамінів. У результаті досліджень були зроблені важливі висновки щодо відповідності консервованої овочевої продукції профілям поживних речовин, відповідно до рекомендацій із дієтичного харчування.

Італійські науковці досліджували різні методи технологічної обробки харчової продукції і овочевої, зокрема, також на їхній вплив на якісні показники цієї продукції. Значна частина досліджень була присвячена характеристикам нових технологій обробки й консервування харчової продукції: електромагнітні, фізико-механічні, опромінювання, біологічні обробки з застосуванням ферментів. Досліджено позитивний і негативний вплив цих обробок на властивості харчових продуктів і здоров'я споживачів [11].

Дослідження, проведені науковцями S. R. Miller W. A. Knudson [12], були присвячені вивченню і порівнянню харчових переваг свіжих, заморожених і консервованих овочів і фруктів. В науковій роботі було досліджено поживну цінність восьми видів овочів і десяти видів фруктів, які споживалися населенням США найчастіше. За результатами проведеного експерименту, було доказано, що консервовані і заморожені овочі і фрукти не поступалися свіжій продукції за вмістом поживних речовин і були рекомендовані для включення до раціону здорового харчування населення.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. В Україні традиційно споживається велика кількість плодоовочевої продукції. Сьогодні проблема повноцінного харчування українців стоїть дуже гостро у зв'язку з воєнною агресією РФ, під час якої великі площі сільськогосподарських угідь – Херсонщина, Дніпропетровщина, Запорізька, Одеська області та ін., були заміновані. Саме тому перед науковцями й виробничими підприємствами постає завдання пошуку, розробки та впровадження таких технологій у галузі консервування плодоовочевої продукції, які б забезпечили максимальне збереження харчової цінності сировини під час обробки і виробництва готової продукції.

Метою статті є дослідження показників якості консервованої ікри з кабачків з додаванням червоного болгарського перцю.

Виклад основного матеріалу. Вимоги до консервованої овочевої ікри викладені в ДСТУ 3797-98 (ГОСТ 2654-98) [13]. У розділі 3 стандарту наведений сучасний асортимент овочевої ікри:

- ікра з кабачків (чи патисонів);
- ікра кабачкова по-домашньому (з часником);
- ікра з баклажанів;
- ікра з баклажанів «Подільська»;
- ікра з баклажанів «Південна»;
- ікра з баклажанів «Українська»;
- ікра з буряка;
- ікра з гарбуза;
- ікра з цибулі;
- ікра овочева «Любительська».

У розділі 4 ДСТУ 3797-98 (ГОСТ 2654-98) [13] наведено перелік сировини й напівфабрикатів, що застосовуються для виготовлення овочевої сировини. Серед цього переліку зазначений перець солодкий у вигляді пюре і мелений.

Було підготовлено контрольний зразок ікри з кабачків за класичною рецептурою і досліджуваний зразок ікри з кабачків із додаванням червоного болгарського перцю. До складу контрольного зразка входили такі інгредієнти: кабачки свіжі уварені, цибуля ріпчаста та морква обсмажені, томатна паста, олія соняшникова рафінована, сіль кухонна харчова, борошно пшеничне вищого ґатунку, прянощі (перець чорний, перець духмянний, перець червоний мелений). У табл. 2 наведено харчову та енергетичну цінність контрольного зразка ікри з кабачків [14].

Таблиця 2 – Харчова та енергетична цінність контрольного зразка ікри з кабачків

Вміст у контрольному зразку	Показники					
	Білки, г	Вуглеводи, г - з них цукри, г	Жири, г - з них ненасичені, г	Сіль, г	Холестерин, мг	Енергетична цінність, ккал
1,0		8,0	3,5	1,5	0	67,5
		7,5	0,45			

З рецептури досліджуваного зразка ікри було виключено олію соняшкову рафіновану та борошно пшеничне вищого ґатунку тому, що зразок ікри з кабачків із вмістом червоного болгарського перцю готували шляхом уварювання в киплячій воді без обсмажування в олії. Такі заміни в рецептурі й технології були зроблені з метою створення дієтичної, профілактичної та оздоровчої продукції, яку можна пропонувати споживачам з хворобами шлунку, підшлункової залози та ін.

До складу досліджуваного зразка було додано свіжий червоний болгарський перець з метою збагачення овочевої ікри вітамінами, мікроелементами та харчовими волокнами. У табл. 3 наведена харчова та енергетична цінність та хімічний склад червоного болгарського перцю [15].

Таблиця 3 – Харчова, енергетична цінність та хімічний склад червоного болгарського перцю

Показники	Вміст у перці червоному болгарському
Харчова та енергетична цінність, г на 100 г продукту	
Білки	1,0
Вуглеводи	6,0
- з них цукри	4,2
Жири	0,3
- насичені	0,059
Холестерин	0 мг
Енергетична цінність	27 ккал на 100 г продукту
Мінеральні речовини, мг/100 г	
Ca	7,0
Mg	12,0
Fe	0,43
Zn	0,25
K	211,0
Na	4,0
P	26,0
Se	0,1 мкг
Mn	0,112
Cu	0,017
Вітаміни, мг/100 г	
A	9,0
C	127,7
E	1,58
B ₁	0,05
B ₂	0,09
B ₃	0,98
B ₆	0,29
B ₉	46,0 мкг
PP	1,0
H (біотин)	0,06 мкг
K	4,9 мкг
Каротин	1624,0 мкг
Бета-криптоксантин	490 мкг
Лютеїн	51 мкг

З даних табл. 2 бачимо, що використання в рецептурі досліджуваного зразка ікри з кабачків червоного болгарського перцю є доцільним. Червоний болгарський перець має унікальний хімічний склад – велику кількість вітамінів (у тому числі рідкісних: бета-криптоксантин, що підвищує імунітет організму людини, лютеїн – важливий вітамін для підтримання здорового зору) і мінеральних речовин. Червоний болгарський перець – це дієтичний продукт, який не містить холестерину, має незначний вміст насичених жирів – 0,059 г/100 г продукту та цукрів – 4,2 г/100 г продукту.

Контрольний зразок готували за таким етапами: підготовка овочевої сировини (миття і очищення кабачків, моркви, цибулі); нарізання сировини й подрібнення; бланшування кабачків; протирання маси після бланшування на металевому ситі (діаметр отворів не більше ніж 3 мм); обсмаження подрібненої моркви та цибулі з додаванням борошна; подрібнення прянощів і змішування з цукром і сіллю та підігрітою томатною пастою; змішування і уварювання всіх компонентів ікри до ущільнення маси; наповнення гарячою ікрою стерильної скляної тари; стерилізація консервів 30 хвилин при температурі 110 °С.

Досліджуваний зразок готували без етапу обжарювання і не використовували соняшникову олію та борошно. Протерту масу після бланшування уварювали до ущільнення консистенції, після чого вкладали у стерильну скляну тару і стерилізували 30 хвилин при температурі 110 °С.

Після приготування зразків проводили оцінювання їх якісних показників відповідно ДСТУ 3797-98 (ГОСТ 2654-98) [13]. Зовнішній вигляд зразків ікри з кабачків представлений на рис. 3 і 4.



Рис. 3. Зовнішній вигляд контрольного зразка ікри з кабачків



Рис. 4. Зовнішній вигляд зразка ікри з кабачків із додаванням червоного болгарського перцю

Результати оцінювання органолептичних показників зразків ікри з кабачків наведені в табл. 4.

За результатами оцінювання органолептичних показників виявили: контрольний і досліджуваний зразки відповідали показникам, зазначеним у ДСТУ 3797-98 (ГОСТ 2654-98) [13]. Досліджуваний зразок мав приємний присмак і легкий відтінок запаху червоного болгарського перцю, введеного до складу зразка. Також у кольорі досліджуваного зразка був помітний незначний червоний відтінок.

Таблиця 4 – Результати оцінювання органолептичних показників зразків ікри з кабачків

Назва показника	Характеристика показника за ДСТУ 3797-98 (ГОСТ 2654-98)	Характеристика показників у зразків	
		контрольний	зразок з додаванням червоного болгарського перцю
Зовнішній вигляд і консистенція	Однорідна, рівномірно подрібнена маса з помітними вкрапленнями зелені та прянощів, без грубого насіння переспілих овочів, грубих включень плодоніжок і без помітного відокремлення рідини. Консистенція така, що мажеться, чи злегка зерниста.	Однорідна, рівномірно подрібнена маса з помітними вкрапленнями прянощів, без грубого насіння переспілих овочів, грубих включень плодоніжок і без помітного відокремлення рідини. Консистенція така, що мажеться.	Однорідна, рівномірно подрібнена маса з помітними вкрапленнями зелені та прянощів, без грубого насіння переспілих овочів, грубих включень плодоніжок і без помітного відокремлення рідини. Консистенція злегка зерниста.
Смак і запах	Властиві ікри, виготовлені з певного виду обсмажених чи бланшованих овочів, чи з суміші обсмажених і бланшованих овочів. Не допускається присмак згірклої і непрожареної олії та наявність сторонніх присмаку і запаху.	Властиві ікри, виготовлені з суміші обсмажених і бланшованих овочів. Смак і запах чисті, приємні без присмаків згірклої і непрожареної олії, без сторонніх присмаку і запаху.	Властиві ікри, виготовлені з бланшованих овочів із приємним легким присмаком і запахом солодкого болгарського перцю. Смак і запах чисті, приємні без сторонніх присмаку і запаху.
Колір	Однорідний за всією масою для ікри з кабачків – від жовтого до ясно-коричневого.	Однорідний за всією масою жовто-коричневий.	Однорідний за всією масою ясно-коричневий з червоним відтінком.

Були досліджені фізико-хімічні показники зразків ікри з кабачків: масова частка сухих речовин, масова частка титрованої кислотності, домішки рослинного походження, сторонні домішки.

У табл. 5 наведено результати дослідження фізико-хімічних показників зразків ікри з кабачків.

Таблиця 5 – Результати дослідження фізико-хімічних показників зразків ікри з кабачків

Назва показника	Характеристика показника за ДСТУ 3797-98 (ГОСТ 2654-98)	Характеристика показників у зразків	
		контрольний	зразок з додаванням червоного болгарського перцю
Масова частка сухих речовин, %, не менше	19	27	22
Масова частка титрованої кислотності у розрахунку на яблучну кислоту, %, не більше	0,5	0,3	0,5
Домішки рослинного походження	Не допускаються	Не виявлено	Не виявлено
Сторонні домішки	Не допускаються	Не виявлено	Не виявлено

З табл. 5 бачимо, що за результатами оцінювання найважливіших фізико-хімічних показників, зразки ікри з кабачків повністю відповідали вимогам ДСТУ 3797-98 (ГОСТ 2654-98). Показник - масова частка сухих речовин у досліджуваного зразка був нижчим, ніж у контрольного, можливо, з причини відсутності в рецептурі зразка пшеничного борошна та заміни процесу обжарювання сировини на варіння в киплячій воді. Фактичне значення показника - масова частка титрованої кислотності, у досліджуваного зразка було однаковим з нормативним показником (0,5 %), цей же показник у контрольного зразка (0,3 %) був у межах нормативу, але меншим від показника досліджуваного зразка. В обох зразках не було виявлено домішок рослинного походження і сторонніх домішок.

Висновки. Раціональне харчування передбачає створення збалансованого раціону, що включав би необхідну людині кількість вітамінів, мікроелементів та інших поживних речовин незалежно від сезону, протягом всього року. Показники якості досліджуваного зразка ікри кабачкової з додаванням червоного болгарського перцю, повністю відповідали вимогам ДСТУ 3797-98 (ГОСТ 2654-98) і мали незначні відхилення від показників контрольного зразка. Було відмічено, що досліджуваний зразок відрізнявся приємним смаком і запахом, завдяки вмісту болгарського перцю. Вилучення з рецептури досліджуваного зразка ікри олії соняшникової та пшеничного борошна, а також заміна процесу обсмажування на варіння в киплячій воді, сприяють створенню дієтичного продукту, який рекомендується для споживання особам з проблемами травлення. Отже, пошук нових методів консервування, рецептур, нетрадиційних видів сировини для створення профілактичного та оздоровчого асортименту консервованої овочевої продукції – головне завдання науковців, які впроваджують результати своїх досліджень у виробництво.

Список використаних джерел

1. Аналіз ринку овочевої консервації в Україні. 2024 рік [Електронний ресурс] // Дослідження ринків. – 2024. – Режим доступу: <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-ovoshnoj-konservacii-v-ukraine-2024-god>.
2. Таранова, Н. Огляд ринку консервації в Україні. З якими труднощами стикаються виробники та чи витісняє імпорт українську продукцію [Електронний ресурс] / Наталія Таранова, Олексій Козаченко // delo.ua. – Режим доступу: <https://delo.ua/business/oglyad-rinku-konservaciyi-v-ukrayini-z-yakimi-trudnoshhami-stikayutsya-virobniki-ta-ci-vitisnyaje-import-ukrayinsku-produkciyu-420890>.
3. Список компаній - Кабачкова ікра – Україна [Електронний ресурс] // КОМПАС. – 2024. – Режим доступу: <https://ua.kompass.com/a/%D0%BA%D0%B0%D0%B1%D0%B0%D1%87%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0-%D1%96%D0%BA%D1%80%D0%B0/0329008>.
4. ДСТУ 2073:2009. Консерви овочеві та фруктові. Технологічні процеси та способи консервування. Терміни та визначення понять. – [Чинний від 01-07-2009]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2009. – 19 с.
5. Дуденко, Н. В. Математичне моделювання овочевих консервів із заданими споживними властивостями / Н. В. Дуденко, В. С. Ольховська // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2013. – № 16. – С. 116-122.
6. Воевода, Н. В. Оцінка показників ікри оздоровчого спрямування з гарбузу за результатами заміни технологічного процесу / Н. В. Воевода, А. С. Легутенко // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2020. – Том 31 (70), № 4. – С. 208-213.
7. Food preservation techniques and nanotechnology for increased shelf life of fruits, vegetables, beverages and spices: a review / Sridhar A., Ponnuchamy M., Kumar P.S. et al. // Environ Chem Lett. – 2021. – Vol. 19. – Pp. 1715-1735. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01126-2>.
8. Sandhya Singh. Preservation technologies for fresh fruits and vegetables / Sandhya Singh // Stewart Postharvest Review. – 2011. – Vol. 1. – Pp. 5. DOI: 10.2212/spr.2011.1.5.
9. Owusu-Apenten R. Thermal Processing and Canning / R. Owusu-Apenten, E. Vieira // Elementary Food Science. Food Science Text Series. – Springer, Cham., 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-65433-7_12.
10. De Lima Sampaio S. Influence of Canning on Food Bioactives / De Lima Sampaio S., Suárez-Recio M., Aguiló-Aguayo I. // Retention of Bioactives in Food Processing. Food Bioactive Ingredients / Eds. Jafari S.M., Capanoglu E. – Springer, Cham, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96885-4_6.
11. Canning: Impact on Food Products Quality Attributes [Electronic resource] / Paolo Lucci, Deborah Pacetti, Monica Rosa Loizzo, Natale G. Frega. // Food Processing Technologies. – CRC Press, 2016. – Accessed mode: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315372365-10/canning-impact-food-products-quality-attributes-paolo-lucci-deborah-pacetti-monica-rosa-loizzo-natale-frega>.

12. Miller S. R. Nutrition and cost comparisons of select canned, frozen and fresh fruits and vegetables [Electronic resource] / S. R. Miller, W. A. Knudson // *American Journal of Lifestyle Medicine*. – 2014.

13. ДСТУ 3797-98 (ГОСТ 2654-98). Консерви. Ікра овочева. Технічні умови. – [Чинний від 01-01-2000]. – Київ : Держстандарт України, 1999. – 14 с.

14. Калайда К. В. Технологія зберігання, консервування та переробки плодів і овочів : підручник / К. В. Калайда, Л. Ю. Матенчук, В. М. Найченко [та ін.]. – Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. – 291 с.

15. Гнатюк Перець червоний солодкий: хімічний склад, калорійність, корисні властивості. 2024 рік [Електронний ресурс] / Гнатюк // dovidka.biz.ua – Режим доступу: <https://dovidka.biz.ua/perets-chervoniy-solodkiy-himichniy-sklad-kaloriynist-korisni-vlastivosti/>.

References

1. *Doslidzhennia rynkiv [Market research]*. (2024). Analiz rynku ovochevoi konservatsii v Ukraini. 2024 rik [Analysis of the vegetable canning market in Ukraine]. <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-ovoshnoj-konservacii-v-ukraine-2024-god>.

2. Taranova, N., Kozachenko, O. (n.d.). Ohliad rynku konservatsii v Ukraini. Z yakumy trudnoshchamy stykaiutsia vyrobnyky ta chy vytisniaie import ukrainsku produktsiiu [Review of the conservation market in Ukraine. What difficulties do producers face and whether imports displace Ukrainian products]. *delo.ua*. <https://delo.ua/business/oglyad-rinku-konservaciyi-v-ukrayini-z-yakimi-trudnoshhami-stikayutsya-virobniki-ta-ci-vitisnyaje-import-ukrayinsku-produkciyu-420890>.

3. КОМПАС. (2024). Spysok kompanii - Kabachkova ikra – Ukraina [List of companies - Zucchini caviar - Ukraine]. <https://ua.kompass.com/a/%D0%BA%D0%B0%D0%B1%D0%B0%D1%87%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0-%D1%96%D0%BA%D1%80%D0%B0/0329008>.

4. *Derzhspozhyvstandart Ukrainy [State Standard of Ukraine]*. (2009). DSTU 2073:2009. Konservy ovochevi ta fruktovi. Tekhnolohichni protsesy ta sposoby konservuvannia. Terminy ta vyznachennia poniat [DSTU 2073:2009. Canned vegetables and fruits. Technological processes and methods of canning. Terms and definitions of concepts].

5. Dudenko, N.V., Olkhovska, V.S. (2013). Matematyчне modeliuвання ovochevykh konserviv iz zadanyimi spozhyvnymi vlastyvostiamy [Mathematical modeling of canned vegetables with specified consumer properties]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Zbirnyk naukovykh prats. Serii: *Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of scientific papers. Series: New solutions in modern technologies*, (16), 116-122.

6. Voievoda, N.V., Lehutenko, A.S. (2020). Otsinka pokaznykiv ikry ozdorovchoho spriamuvannia z harbuzu za rezultatamy zaminy tekhnolohichnoho protsesu [Assessment of indicators of health-promoting pumpkin caviar based on the results of replacing the technological process]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky – Scientific notes of the V. I. Vernadsky Tavrichesky National University. Series: Technical Sciences*, 31(70)(4), 208-213.

7. Sridhar, A., Ponnuchamy, M., Kumar, P.S. et al. (2021). Food preservation techniques and nanotechnology for increased shelf life of fruits, vegetables, beverages and spices: a review. *Environ Chem Lett.*, 19, 1715–1735. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01126-2>.

8. Sandhya Singh. (2011). Preservation technologies for fresh fruits and vegetables. *Stewart Postharvest Review*, 1, 5. DOI: 10.2212/spr.2011.1.5.

9. Owusu-Apenten, R., Vieira, E. (2023). Thermal Processing and Canning. *Elementary Food Science. Food Science Text Series*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65433-7_12.

10. De Lima Sampaio, S., Suárez-Recio, M., Aguiló-Aguayo, I. (2022). Influence of Canning on Food Bioactives. In Jafari, S.M., Capanoglu, E. (Eds.), *Retention of Bioactives in Food Processing. Food Bioactive Ingredients*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96885-4_6.

11. Paolo, Lucci, Deborah, Pacetti, Monica, Rosa, Loizzo, Natale, G. Frega. (2016). Canning: Impact on Food Products Quality Attributes. *Food Processing Technologies*. CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781315372365-10/canning-impact-food-products-quality-attributes-paolo-lucci-deborah-pacetti-monica-rosa-loizzo-natale-frega>.

12. Miller, S.R., Knudson, W.A. (2014). Nutrition and cost comparisons of select canned, frozen and fresh fruits and vegetables. *American Journal of Lifestyle Medicine*, 8(6).

13. *Derzhspozhyvstandart Ukrainy [State Standard of Ukraine]*. (1999). DSTU 3797-98 (HOST 2654-98). Konservy. Ikra ovocheva. Tekhnichni umovy [DSTU 3797-98 (GOST 2654-98). Canned food. Vegetable caviar. Technical conditions].

14. Kalaida, K.V., Matenchuk, L.Yu., Naichenko, V.M. et al. (2017). *Tekhnolohiia zberihannia, konservuvannia ta pererobky plodiv i ovochiv [Technology of storage, canning and processing of fruits and vegetables]*. Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr «Liuks».

Отримано 10.12.2024

UDC 664.843:635.621

Raisa Volkova

Senior Lecturer of the Department of Food Technology and Ecology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: volkova6402@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6339-8461>. ResearcherID: [EFH-1860-2022](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1860-2022/)

STUDY OF QUALITY INDICATORS OF ZUCCHINI CAVIAR WITH THE ADDITION OF RED BULGARIAN PEPPER

In the production of canned vegetable products, there has been a trend towards increasing its nutritional value and increasing the range of this group of products of a health, therapeutic, prophylactic and preventive nature. Canned vegetable products are always in high demand in Ukraine and ensure a balanced diet for domestic consumers throughout the year. Therefore, the most important task of scientists and manufacturing enterprises is to search and research:

- new technologies for the production of canned vegetables, which would ensure a high degree of preservation of the nutritional value of the products for a long time;

- non-traditional types of raw materials in order to enrich the composition of canned vegetables;

- creation of original recipes for canned vegetable products for baby food, restaurants, and trade enterprises.

Having analyzed scientific publications on the development of new types of canned vegetable products, it was found that the topic of searching for new technologies, raw materials, and recipes remains promising and relevant for further research.

The aim of the paper was to study the quality indicators of zucchini caviar with the addition of red bell pepper.

The nutritional value and chemical composition of zucchini caviar with the addition of red bell pepper were analyzed and compared with classic zucchini caviar. According to the results of the research, it was found that zucchini caviar with the addition of red bell pepper differed from traditional zucchini caviar in a higher content of vitamins, trace elements, and increased nutritional value. The organoleptic and physicochemical indicators of the studied sample fully comply with the requirements of DSTU 3797-98 Canned food. Vegetable caviar. Technical conditions.

Canned zucchini caviar with the addition of red bell pepper can be recommended for industrial production in order to expand the range of the group of canned food for preventive and health purposes.

Keywords: *chemical composition of vegetable raw materials for canning, canned zucchini caviar; red bell pepper; nutritional value and quality indicators of zucchini caviar with the addition of bell pepper.*

Table: 5. Fig.: 4. References: 15.

**Ольга Ігорівна Шліхтер¹, Ірина Володимирівна Косогіна²,
Олексій Володимирович Косогін³**

¹магістр, кафедра фізичної хімії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: shlikhter.olga@iit.kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5193-3756>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології неорганічних речовин, водочищення та загальної хімічної технології, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: kosoginairyna@gmail.com. ORCID: <https://0000-0002-9795-7110>
ResearcherID: I-3714-2018 SCOPUS Author ID: 56565578300

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: o.kosogin@kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8379-9580>
ResearcherID: I-3040-2018. SCOPUS Author ID: 55463712800

МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ВОДИ В УКРАЇНІ ТА ВПЛИВ ВІЙНИ НА ЇЇ ЯКІСТЬ

Здійснено моніторинг якості води в Україні за трьома показниками: каламутність, вміст сполук заліза та марганцю. Проведено порівняльний аналіз зміни показників якості води в різних регіонах України в залежності від сезону та географічного розташування. Встановлено негативний вплив військових дій на якість води в різних точках водозабору шляхом порівняння результатів аналізів якості водопровідної води за каламутністю і вмістом солей заліза та марганцю зі статистичними даними щодо обстрілів території України, зібраними на основі відкритої інформації з різних джерел.

Ключові слова: моніторинг; якість води; каламутність; вміст сполук заліза; вміст сполук марганцю; водна криза.

Рис.: 4. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) та Організації Об'єднаних Націй (ООН) на даний час принаймні 80 країн відчувають дефіцит води, чотири мільярди людей (майже дві третини населення світу) мають гостру нестачу води щонайменше протягом одного місяця щороку. Понад два мільярди людей живуть у країнах, де водопостачання є недостатнім. Уже до 2025 року половина населення світу може проживати в районах, де відчуватиметься нестача води. Близько 700 мільйонів людей можуть бути змушені покинути свої домівки через гострий дефіцит води до 2030 року. До 2040 року приблизно кожна четверта дитина у світі житиме в районах з надзвичайно високим рівнем водного стресу [1].

Через таку тенденцію у 2015 році світові лідери погодили 17 Глобальних цілей, спрямованих на створення кращого світу до 2030 року шляхом подолання бідності, боротьби з нерівністю та вирішення нагальної проблеми зміни клімату [2,3], щоб забезпечити загальний та справедливий доступ до безпечної та недорогої питної води, що покращить становище із водною кризою у світі.

Постановка проблеми. Здійснення моніторингу якості води в Україні за певними показниками, а саме, каламутністю і вмістом сполук заліза та марганцю дозволить оцінити вплив військових дій на якість води в різних регіонах України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі можна виділити низку причин глобальної водної кризи [4]: зміна клімату, дефіцит водних ресурсів, зниження якості питної води та ін.

У країнах Африки та Азії за прогнозами ООН, кількість людей, які відчувають водний стрес уже понад 75 мільйонів, що пов'язано зі зменшенням середньої кількості опадів та зниженням загальної доступності води у великих річкових басейнах Центральної, Південної, Східної та Південно-Східної Азії. Також варто відмітити, що положення даних регіонів погіршується не тільки через стрімкі зміни клімату, але через дефіцит (нестачу прісної води) та забрудненість більшості водних об'єктів цих регіонів [5].

Дефіцит води стає критичною проблемою для все більшої кількості країн. Тому зараз перед світом та Україною стоїть питання правильного та ефективного використання природних водних ресурсів із новітнім технологічним рішенням для прискорення прогресу в досягненні Цілей сталого розвитку [6].

На цей час можемо спостерігати таку тенденцію, що навіть у країнах з достатніми водними ресурсами спостерігається дефіцит води. Руйнування водної інфраструктури та систем розподілу внаслідок воєнних дій, забруднення та не ефективного управління водними ресурсами спричиняє екологічну катастрофу й ускладнює доступність отримання питної води.

Якщо говорити про Україну, то вона посідає 32-ге місце з 40 країн Європи за доступністю питної води і є однією з країн, яким загрожує дефіцит води [7]. Проблеми із застарілими водопровідними станціями та очисними спорудами, які не в змозі витримати поточні навантаження і не відповідають сучасним стандартам щодо підготовки води та очищення стічних вод, посилилися через руйнування та пошкодження водної інфраструктури, спричиненою повномасштабною війною в Україні.

Протягом останнього року воєнних дій на території України збитки в секторі водопостачання та водовідведення оцінюються приблизно у 7,5 млрд доларів [7]. У більшості випадків інфраструктура у зоні воєнного конфлікту зруйнована і не підлягає відновленню. Крім того, на деокупованих територіях зафіксовано забруднення річкових вод із перевищенням концентрації ртуті, міді, цинку та марганцю, а 75 % води, що надається споживачам, отримується з поверхневих джерел, таких як річки.

Руйнування Каховської ГЕС 6 червня 2023 року стало однією з найсерйозніших екологічних та гуманітарних катастроф у південних областях в історії країни. Каховське водосховище втратило 70 % свого обсягу, а негативний вплив охопив 600 тисяч гектарів землі [8; 9]. Фінансові втрати, спричинені цією катастрофою, оцінюються приблизно у 4 млрд доларів [8-10]. Руйнування гідротехнічних споруд призвело до відключення водопостачання та різкого погіршення місцевих екосистем, що є серйозним глобальним екологічним ризиком. Зменшення доступності питної води спричинило погіршення санітарних та екологічних умов в регіонах, які вже страждали від окупації та військового конфлікту. Унаслідок цього на цих територіях нагальною проблемою стало забруднення води водорозчинними компонентами, які містяться в боєприпасах, та неочищеними стічними водами [8; 11].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Відсутність встановленого взаємозв'язку між підвищенням рівня забруднення поверхневих джерел, зокрема, через постійні ракетні обстріли території України країною-агресором, та якістю водопровідної води, що використовується населенням України в побуті, може призвести до невчасного прийняття рішень щодо адаптації технології водопідготовки для забезпечення населення безпечною питною водою.

Мета дослідження. Здійснити порівняльний аналіз зміни показників якості води в різних регіонах України залежно від сезону та географічного розташування в області інтенсивних обстрілів з боку країни-агресора.

Виклад основного матеріалу. Моніторинг якості питної води з різних джерел водопостачання (водопровід, свердловини, колодязі) по всій території України, де наразі це можливо, здійснено в межах проєкту «Безпечна питна вода в Україні: доступ до інформації про якість води та методи водопідготовки» за фінансування Фінського Фонду Місцевого Співробітництва Посольства Фінляндії в Україні під керівництвом громадської організації «Всеукраїнське водне товариство «Вотернет» (ГО «ВУВТ «Вотернет»).

Аналіз води здійснювався акредитованою Лабораторією іонного обміну та адсорбції хіміко-технологічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського (Свідоцтво № ПТ-191/23 від 29.05.2023 р., ДП «Укрметртестстандарт»), за індикаторними показниками, які є маркерами відповідності якості водопровідної води згідно норм ДСанПіН 2.2.4-171-10.

За результатами моніторингу ГО «ВУВТ «Вотернет» розроблена онлайн Карта якості води України, яка є зручним інструментом для візуалізації отриманих результатів [12]. У статті здійснено аналіз зміни якості води впродовж 2023-2024 рр. за трьома показниками якості води: каламутність і вміст солей заліза та марганцю.

Аналізуючи дані, отримані ГО «ВУВТ «Вотернет» до початку інтенсивних воєнних дій у 2021 році та через рік від початку повномасштабного вторгнення в Україну, можна помітити значне погіршення якості водопровідної води за низкою показників (табл. 1). Найбільше відхилення від норм ДСанПіН спостерігається за такими показниками, як каламутність, вміст заліза та марганцю.

Таблиця 1 – Відсоток нестандартних проб* води за показниками якості води від загальної кількості проб за певний період

Показник	Відсоток нестандартних проб води у 2021 році, %2021	Відсоток нестандартних проб води у 2021 році, %2023/2024	Різниця
Запах	4	14	10
Каламутність	20	48	28
Окиснюваність	28	29	1
Кольоровість	37	36	-1
Твердість	19	29	10
Солевміст	4	11	7
Залізо	23	32	9
Нітрати	2	1	-1
рН	0	3	3
Марганець	4	17	13
Хлориди	1	7	6

*Нестандартна проба води – це проба води, що не відповідає вимогам, встановленим у документі ДСанПіН «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10).

Якщо каламутність зумовлена насамперед вмістом нерозчинних речовин (пісок, глина, водорості, мул), то підвищений вміст заліза та марганцю може бути спричинений кількома факторами:

- розвитком корозійних процесів в трубопроводах, якими подається очищена вода до споживача;
- нестачею реагентів на станціях водопідготовки, що спричинено ускладненням їхньої роботи в результаті активних обстрілів та частковим руйнуванням критичної інфраструктури;
- погіршення якості поверхневих та підземних вод, що є вихідним джерелом водозбору для отримання питної води, внаслідок потрапляння залишків боєприпасів і продуктів їх згоряння, та продуктів корозії як великої кількості пошкодженої воєнної техніки, яка залишається на полях, так і зруйнованих металокопункцій.

З метою кращого розуміння впливу активності та/або локалізації воєнних дій на якість води в різних точках водозбору, було проведено порівняння результатів аналізів якості водопровідної води за такими показниками, як вміст заліза, мангану та каламутності, із статистичними даними щодо обстрілів території України, зібраними на основі офіційної інформації та представленими у вигляді інтерактивної карти «Карта обстрілів України російськими військами» [13].

Статистична інформація, отримана ГО «ВУВТ «Вотернет» в межах моніторингу якості води в Україні, охоплює часовий період з початку 2023 року й узагальнювалась у середньому кожні 4 місяці року. На рис. рис. 1-4 наведено точки відбору проб (міста й населені пункти) та їх кількість на кожен визначений показник, при цьому колір точки відбору вказує на значення показника відносно нормативу ДСанПіН (зелений – нижче нормативу, червоний – вище). Також на рисунках наведено карти, де позначено населені пункти, які зазнавали обстрілів за відповідний період.

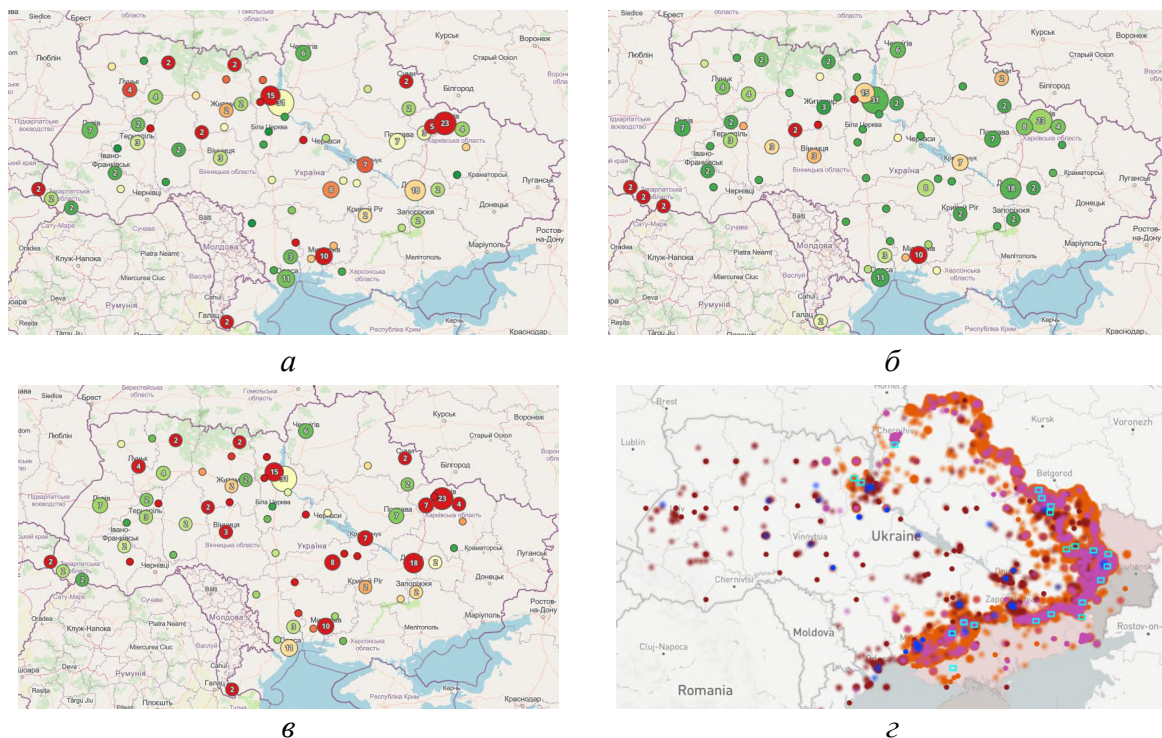


Рис. 1. Місяця відбору проб для аналізу якості води та інтенсивність обстрілів населених пунктів України за період січень-квітень 2023:

а – точки відбору проб на вміст заліза (236 проб); б – точки відбору проб на вміст марганцю (236 проб); в – точки відбору проб на каламутність (236 проб); з) кількість обстрілів станом на 29.04.2023:

- ракетні обстріли; ● авіаційні обстріли; ● артилерійські обстріли; ● удари дронами

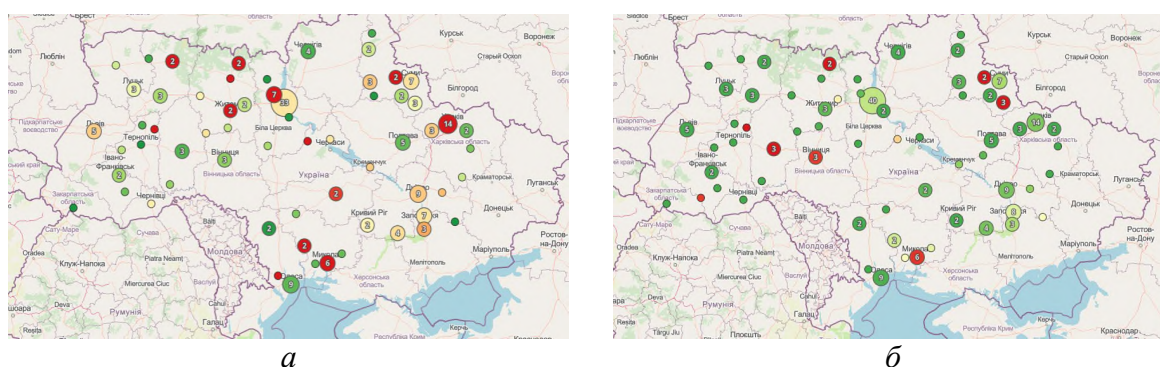
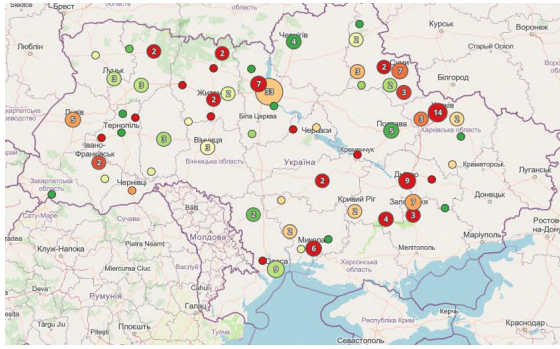


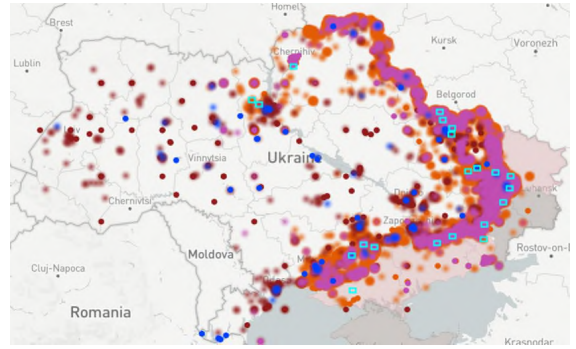
Рис. 2. Місяця відбору проб для аналізу якості води та інтенсивність обстрілів населених пунктів України за період травень-серпень 2023:

а – точки відбору проб на вміст заліза (190 проб); б – точки відбору проб на вміст марганцю (190 проб); в) точки відбору проб на каламутність (190 проб); з) кількість обстрілів станом на 29.08.2023:

- ракетні обстріли; ● авіаційні обстріли; ● артилерійські обстріли; ● удари дронами

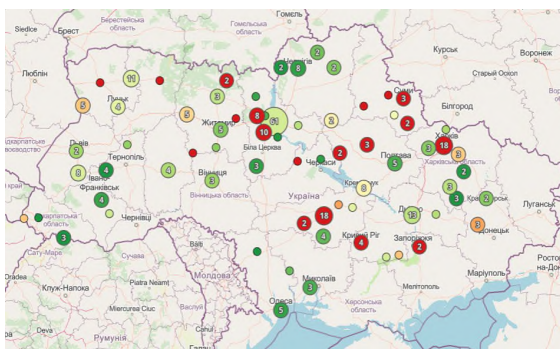


в

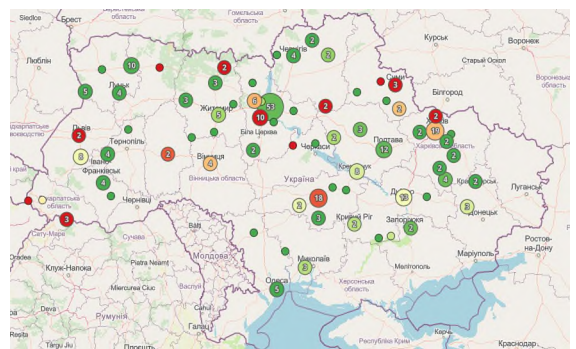


г

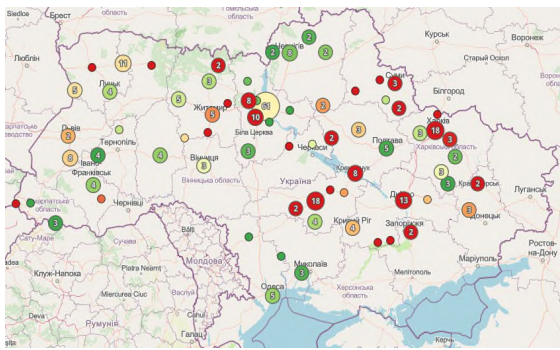
Рис. 2. Закінчення (початок на с. 237)



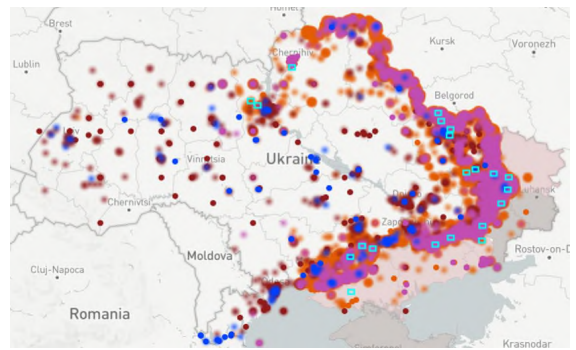
а



б



в



г

Рис. 3. Місяця відбору проб для аналізу якості води та інтенсивність обстрілів населених пунктів України за період вересень-грудень 2023:

а – точки відбору проб на вміст заліза (283 проби); б) точки відбору проб на вміст марганцю (283 проби); в) точки відбору проб на каламутність (283 проби); г) кількість обстрілів станом на 29.12.2023:

- ракетні обстріли; ● авіаційні обстріли; ● артилерійські обстріли; ● удари дронами

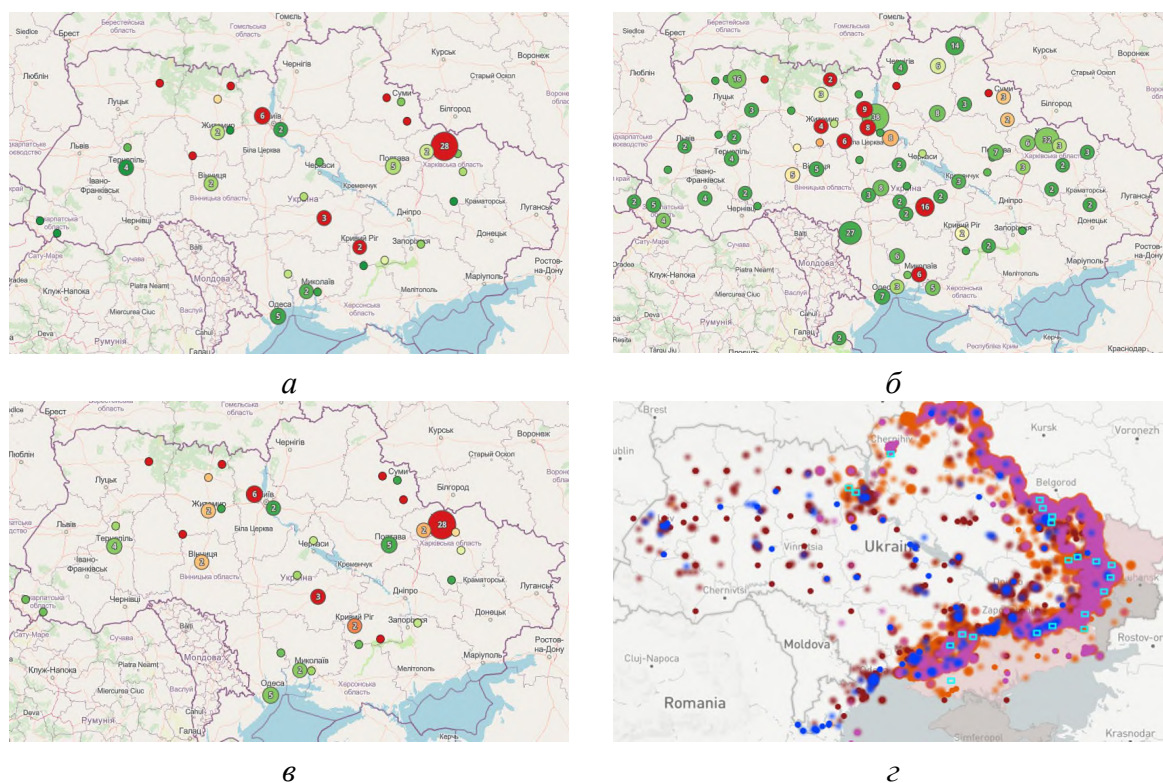


Рис. 4. Місяця відбору проб для аналізу якості води та інтенсивність обстрілів населених пунктів України за період січень-квітень 2024:

a – точки відбору проб на вміст заліза (84 проби); *б* – точки відбору проб на вміст марганцю (253 проби); *в* – точки відбору проб на каламутність (84 проби); *г* – кількість обстрілів станом на 30.04.2024:

- ракетні обстріли; ● авіаційні обстріли; ● артилерійські обстріли; ● удари дронами

Порівняння цих даних чітко демонструє збіг місць інтенсивних обстрілів (*г* на рис. 1-4) із подальшим погіршенням якості водопровідної води, що спричинено як частковим руйнуванням підприємств, що забезпечують підготовку питної води, так і збільшенням кількості забруднюючих агентів в результаті потрапляння залишків боєприпасів чи окремих компонентів літальних засобів в ґрунт з їх подальшим корозійним руйнуванням.

Також проведено точкове порівняння результатів аналізів (табл. 2-4) на каламутність вміст заліза та мангану з інформацією з відкритих джерел про наявність обстрілів по окремих регіонах, що розміщена на сайтах-агрегаторах статистичної інформації [13-16].

При цьому доцільно розділити усі регіони України на три умовні зони за інтенсивністю обстрілів – «прифронтова» зона, яка зазнає найбільших обстрілів (табл. 2); центральна зона (табл. 3) та західна зона (табл. 4).

Можна помітити, що в усіх «прифронтових» областях спостерігається суттєве перевищення вмісту заліза і мангану та висока каламутність (табл. 2), при цьому ці регіони найбільше потерпають від обстрілів, що негативно відбивається на якості очищеної води як в результаті погіршення якості природних вод, так і руйнування критичної водної інфраструктури.

Виключенням є достатньо висока якість води в населених пунктах Чернігівської області, що, ймовірно пов'язано зі здійсненням водозабору з підземних джерел.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Таблиця 2 – Параметри якості води в «прифронтових» областях України

№	Область, населений пункт	Вміст заліза, мг/дм ³	Вміст мангану, мг/дм ³	Каламутність, мг/дм ³
Гігієнічні нормативи відповідно ДСанПін 2.2.4-171-10		0,2	0,05	0,58
1	Сумська	0,01 – 11,94	0,01 – 0,32	0,1 – 38,2
	Суми	0,08 до 11,94	0,13-0,18	0,8-12,4; 38,2
	Ромни	1,35	0,01	0,2-11,72
	Охтирка	0,01-0,16	0,13	0,1 -0,4
	Тростянець	0,01-0,88	0,32	1,4-3,4
	Улянівка	0,98-3,61	0,19 – 0,23	20,20
2	Чернігівська	0,02 – 2,68	0,01 – 0,17	0,1 – 25,69
	м. Чернігів	0,19	0,01 – 0,02	0,17-0,69
	Загребелля	0,45-2,68	0,03 -0,17	4,31-25,69
3	Харківська	0,02 – 16,0	0,01 – 0,38	0,1 – 74,5
	Бабаї	1,62-3,74	0,09-0,11	23,4
	Люботин	0,16-0,67	0,08	2,24-5,69
	Пересічне	2,2-3,76	0,02-0,12	до 21,9
	Харків	0,1-1,1	0,01-0,04	до 22,9
	Мерефа	0,38-16,0	0,16-0,38	до 74,5
4	Дніпропетровська	0,1 - 0,56	0,01 - 0,34	0,53 – 8,1
	Кривий Ріг	0,13-0,56	0,01 - 0,04	0,91-1,9
	Новомосковськ	0,1-0,27	0,07- 0,08	1,03-8,1
	Дніпро	0,1-0,33	0,01 – 0,34	0,6-5,34
	Павлоград	0,12-0,28	0,01 -0,02	0,69-3,10
5	Кіровоградська	0,01 – 7,74	0,01 – 0,04	0,1 – 9,14
	Кропивницький	0,13-2,74	0,12 - 1,43	1,38 - 9,14
6	Запорізька	0,01 – 0,58	0,01 – 0,24	0,4 – 3,62
	Кушугум	0,25 – 0,58	0,01 - 0,07	1,38-3,62
	Вільнянськ	0,09 – 0,25	0,01 – 0,24	0,69-3,10
7	Херсонська	0,01 – 0,04	0,01 – 0,04	0,2
8	Миколаївська	0,5 – 2,95	0,01 – 0,91	1,5-14,83
	Миколаїв	0,58 - 2,95	0,49-0,91	1,55 -14,83
9	Одеська	0,01 – 0,22	0,01-0,02	0,3 – 1,9

Відхилення від нормативів спостерігається і у деяких регіонах центральних областей (табл. 3), при цьому значне перевищення нормативів якості питної води може бути як спричинене масованими обстрілами певних населених пунктів (наприклад, Миргород, Кременчук, Калинівка, Плесецьке) та веденням бойових дій у певний проміжок часу безпосередньо у містах (Буча, Гостомель, Луб'янка), так і мати невстановлену природу погіршення якості води (Загребелля, Здвижівка, Народичі).

Таблиця 3 – Параметри якості води в центральних областях України

№	Область, населений пункт	Вміст заліза, мг/дм ³	Вміст мангану, мг/дм ³	Каламутність, мг/дм ³
1	2	3	4	5
Гігієнічні нормативи відповідно ДСанПін 2.2.4-171-10		0,2	0,05	0,58
1	Полтавська	0,01 – 1,2	0,01 – 0,37	0,1 – 17,3
	м. Миргород	0,11 – 0,93	0,02	0,34 - 3,19
	Світловодськ	1,2	0,11 - 0,37	17,3
	Полтава	0,02-0,32	0,01-0,02	0,1 – 0,2
	Кременчук	0,19-0,3	0,01-0,1	0,4 – 3,2

Закінчення табл. 3

1	2	3	4	5
2	Київська	0,01 – 5,9	0,01 – 0,6	0,1 – 34,9
	Буча	0,01 – 0,47	0,01 – 0,14	0,1 – 1,0
	Луб'янка	0,93 – 1,38	0,01 – 0,6	3 -7,2
	Гостомель	1,18 – 2,25	0,02 – 0,12	5,9 - 14,2
	Здвижівка	2,9 – 5,9	0,07-0,1	2,2 - 34,9
	Калинівка	0,46-5,13	0,01 – 0,32	0,7 - 28,7
	Данилівка	0,11-3,58	0,01 – 0,4	0,86-1,9
	Плесецьке	-	0,02 -0,2	29,3
	Ворзель	0,36	0,11 – 0,13	2,2
	Бабинці	0,11-0,77	0,01-0,02	3,7
	Ірпінь	0,03-0,1	0,01-0,04	0,2
3	Черкаська	0,5 - 2,19	0,01 – 0,12	0,3 – 13,2
	Мартинівка	0,5 - 2,19	0,05 – 0,12	2,8 – 13,2
4	Житомирська	2,8 – 4,27	0,01 – 1,1	0,3 – 40,52
	Народичі	2,8 - 4,27	0,01-0,29	24,31-40,52
	Житомир	0,08-0,44	0,01 – 0,04	0,52-5,17
	Попельня	0,02	0,01 – 1,1	0,3
	Бердичів		0,01 – 0,2	

У західних областях України переважаючим джерелом водозабору для подальшого отримання питної води є підземні води, які характеризуються високим вмістом заліза. Поєднуючи цей фактор із порівняно низькою інтенсивністю обстрілів в аналізованій період (з початку 2023 до 30.04.2024) можна припустити, що перевищення нормативів за аналізованими показниками (табл. 4) пов'язано зі зниженням якості вихідної води, недостатньою забезпеченістю підприємств з водопідготовки необхідними реагентами та збільшенням водоспоживання в цих регіонах через переміщення частини населення з тимчасово окупованих територій.

Таблиця 4 – Параметри якості води в західних областях України

№	Область, населений пункт	Вміст заліза, мг/дм ³	Вміст мангану, мг/дм ³	Каламутність, мг/дм ³
1	2	3	4	5
Гігієнічні нормативи відповідно ДСанПін 2.2.4-171-10		0,2	0,05	0,58
1	Рівненська	0,01 – 4,76	0,01-0,3	0,2 – 24,0
	Сарни	0,31	0,1 – 0,3	0,5
	Чудель	0,16 - 4,76	0,01-0,3	2,1 - 24,0
2	Волинська	0,15 - 0,83	0,01 - 0,04	0,2 – 3,4
	Ковель	0,15-0,83	0,01-0,04	1,8
	Луцьк	0,13-0,44	0,01	3,4
3	Вінницька	0,01 – 0,2	0,01 – 0,18	0,1 - 0,9
4	Хмельницька	0,03 – 0,21	0,01 – 0,1	0,2 – 0,4
5	Тернопільська	0,58 - 1,93	0,01 – 0,21	0,1 - 10,1
	Ланівці	0,58 - 1,93	0,08 – 0,21	1,9 – 10,1
6	Львівська	0,01 – 1,06	0,01 – 0,3	0,1 – 3,6
	Жидачів	0,44 -0,49	0,01 – 0,3	2
	Муроване	0,18 -1,06	0,3	3,6
7	Чернівецька	0,22	0,01	0,9
8	Івано-Франківська	0,01 – 0,18	0,01	0,5 – 2,07
	Коломия	0,07 - 0,18	0,01	0,86 - 2,07
9	Закарпатська	0,01 - 7,10	0,01 – 4,1	2,4 – 37,0
	Чоп	0,27 – 7,10	0,33 – 0,74	2,4 – 37,0

Закінчення табл. 4

1	2	3	4	5
	Ужгород	0,01	0,01	0,17
	Берегово	0,23	0,57	1,03
	Вишково	0,01-0,06	3,92- 4,1	0,17-0,34

Висновки. Таким чином, проведений аналіз дозволяє зробити наступні висновки. Зміна якості води спостерігається в усіх регіонах України, при цьому найбільші зміни відбуваються в прифронтових та центральних регіонах як внаслідок систематичних обстрілів, що спричиняють руйнування критичної інфраструктури і потрапляння хімічних речовин та продуктів корозії металевого обладнання в поверхневі та ґрунтові води, так і через збільшення навантаження на діючі водопідготовчі станції в результаті зростання споживання води в зони внутрішнього переселення з тимчасово окупованих територій. Однак для отримання повної картини зміни якості води в Україні необхідно здійснювати постійний моніторинг її якості за більшою кількістю показників. Так, необхідно врахувати, що порівнюючи із початком повномасштабного вторгнення, дещо змінився і характер обстрілів – до ракетних та авіаційних ударів все більше додається кількість ударів із використанням беспілотних літальних апаратів, які обладнані бортовими системами електроніки та енергоживлення. Після руйнування цих літальних апаратів компоненти систем можуть стати джерелом великої кількості забруднюючих речовин, таких як нікель, кадмій, цинк, тому доцільним є розширення спектру показників якості води, в тому числі із використанням дистанційних систем моніторингу, наприклад, хімічних чи фізичних сенсорів.

Подяка. Роботу виконано в рамках проекту прикладних наукових досліджень №2709п «Інноваційна технологія оперативного виявлення забруднювачів, що потрапляють у водні об'єкти внаслідок військових дій» за рахунок коштів Державного бюджету України.

Список використаних джерел

1. Water scarcity. UNICEF, for every child [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.unicef.org/wash/water-scarcity>.
2. 17 Цілей сталого розвитку [Electronic resource] / Global Compact.– Access mode: <https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku>.
3. Everything about the Sustainable Development Goal 6: Clean water and sanitation : One Drop Foundation. One Drop [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.onedrop.org/en/news/everything-about-the-sustainable-development-goal-6-clean-water-and-sanitation>.
4. 10 causes of the global water crisis. Concern Worldwide [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.concern.net/news/global-water-crisis-causes>.
5. Special Thematic Report 1: Outlining the impacts of climate change on water and sanitation around the world January 2022 [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ohchr.org/sites/default/files/2022-01/climate-change-1-friendlyversion.pdf>.
6. Novel sources of water. UN environment programme [Electronic resource] – Access mode: <https://www.unep.org/news-and-stories/story/shortages-mount-countries-hunt-novel-sources-water>.
7. UNEP supporting the green recovery in Ukraine [Electronic resource]. – Access mode: <https://ukraine.un.org/en/281772-unep-supporting-green-recovery-ukraine>.
8. Protection of water resources of Ukraine: from crisis to recovery. WAREG European Water Regulation [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.wareg.org/articles/protection-of-water-resources-of-ukraine-from-crisis-to-recovery>.
9. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ecozagroza.gov.ua/map?layer=air_pollution.
10. Яких екологічних наслідків зазнала Україна за час війни окрім збитків від підриву Каховської ГЕС [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/yakih-ekologichnih-naslidkiv-zaznala-ukrayina-za-chas-viyni-okrim-zbitkiv-vid-pidrivu-kahovskoyi-ges>.

11. Вплив воєнних дій на якість повітря в Україні: доповідь Ірини Черниш на Комітеті Верховної Ради України з питань екологічної політики та природокористування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.savednipro.org/vpliv-voennix-dij-na-yakist-povitrya-v-ukrayini>.
12. Безпечна питна вода в Україні: доступ до інформації про якість води та методи водопідготовки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://waternet.ua/water-map-fp>.
13. Під ударом. Що й коли обстрілювала Росія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://texty.org.ua/projects/107440/pid-udarom-sho-i-koly-obstrilyovala-rosiya>.
14. Карта Руйнувань та Відновлення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://reukraine.shtab.net>.
15. Live Universal Awareness Map (“Liveuamap”) [Electronic resource] – Access mode: <https://liveuamap.com/uk>.
16. Deep State [Electronic resource] – Access mode: <https://deepstatemap.live/#6/48.8574870/35.2441406>.

References

1. Water scarcity. (n.d.). <https://www.unicef.org/wash/water-scarcity>.
2. Global Compact. (n.d.). 17 Tsilei staloho rozvytku [17 Sustainable Development Goals]. <https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku>.
3. Everything about the Sustainable Development Goal 6: Clean water and sanitation. One Drop Foundation. One Drop. (n.d.). <https://www.onedrop.org/en/news/everything-about-the-sustainable-development-goal-6-clean-water-and-sanitation/>.
4. 10 causes of the global water crisis. Concern Worldwide. (n.d.). <https://www.concern.net/news/global-water-crisis-causes>.
5. Special Thematic Report 1: Outlining the impacts of climate change on water and sanitation around the world January 2022. (2022). <https://www.ohchr.org/sites/default/files/2022-01/climate-change-1-friendlyversion.pdf>.
6. Novel sources of water. UN environment programme. (n.d.). <https://www.unep.org/news-and-stories/story/shortages-mount-countries-hunt-novel-sources-water>.
7. UNEP supporting the green recovery in Ukraine. (n.d.). <https://ukraine.un.org/en/281772-unesp-supporting-green-recovery-ukraine>
8. Protection of water resources of Ukraine: from crisis to recovery. WAREG European Water Regulation. (n.d.). <https://www.wareg.org/articles/protection-of-water-resources-of-ukraine-from-crisis-to-recovery>.
9. Ofitsiyni resurs Ministerstva zakhystu dovkillya ta pryrodnykh resursiv Ukrayiny [Official resource of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine]. https://ecozagroza.gov.ua/map?layer=air_pollution.
10. Yakykh ekolohichnykh naslidkiv zaznala Ukraina za chas viiny okrim zbytkiv vid pidryvu Kakhovskoi HES(n.d.). <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/yakih-ekologichnih-naslidkiv-zaznala-ukrayina-za-chas-viyni-okrim-zbitkiv-vid-pidryvu-kahovskoyi-ges>.
11. Vplyv voennykh dii na yakist povitria v ukraini: dopovid Iryny Chernysh na Komiteti Verkhovnoi Rady Ukrainy z pytan ekolohichnoi polityky ta pryrodokorystuvannia. (n.d.). <https://www.savednipro.org/vpliv-voennix-dij-na-yakist-povitrya-v-ukrayini>.
12. Bezpechna pytna voda v Ukraini: dostup do informatsii pro yakist vody ta metody vodopidhotovky. (n.d.). <https://waternet.ua/water-map-fp>.
13. Pid udarom. Shcho y koly obstrilyovala Rosiia. (n.d.). <https://texty.org.ua/projects/107440/pid-udarom-sho-i-koly-obstrilyovala-rosiya/>.
14. Karta Ruinuvan ta Vidnovlennia. (n.d.). <https://reukraine.shtab.net/>.
15. Live Universal Awareness Map (“Liveuamap”). (n.d.). <https://liveuamap.com/uk>
16. Deep State. (n.d.). <https://deepstatemap.live/#6/48.8574870/35.2441406>

Отримано 08.12.2024

UDC 543.3

Olha Shlikhter¹, Iryna Kosogina², Oleksii Kosohin³

¹Master-student, Department of electrochemical production technology, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: shlikhter.olga@lil.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-5193-3756>

²PhD in Technical Sciences, Associated Professor of the Department of Inorganic Substances, Water Treatment and General Chemical Technology, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: kosoginairyna@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9795-7110> **Researcher ID:** [I-3714-2018](https://orcid.org/0000-0001-8379-9580) **SCOPUS Author ID:** [56565578300](https://orcid.org/0000-0001-8379-9580)

³PhD in Technical Sciences, Associated Professor of the Department of electrochemical production technology National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: o.kosogin@kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8379-9580>

Researcher ID: [I-3040-2018](https://orcid.org/0000-0001-8379-9580) **SCOPUS Author ID:** [55463712800](https://orcid.org/0000-0001-8379-9580)

**MONITORING OF WATER QUALITY IN UKRAINE
AND THE IMPACT OF THE WAR ON ITS QUALITY**

Water quality in Ukraine has been monitored for the following indicators: turbidity, iron and manganese content, and deterioration of its quality. The correlation between the increase in the level of pollution of surface sources, in particular due to constant missile attacks on the territory of Ukraine by the aggressor country, and the quality of tap water used by the population of Ukraine in everyday life has been established.

A comparative analysis of changes in water quality indicators in different regions of Ukraine has been conducted depending on the season and geographical location. The comparison of data clearly demonstrates the coincidence of places of intensive shelling with further deterioration of tap water quality, which is caused by both partial destruction of plants that provide drinking water preparation, and an increase in the number of polluting agents as a result of the ingress of ammunition residues or individual components of aircraft into the soil with their subsequent corrosive destruction.

It was assumed that the increase in water turbidity in all regions of Ukraine is associated with an increase in the content of insoluble substances (sand, clay, algae, silt). The increased content of iron and manganese may be caused by the deterioration of the quality of surface and groundwater, which is the initial source of water intake for drinking water; due to the ingress of ammunition residues and their combustion products, and due to the ingress of corrosion products of a large number of damaged military equipment remaining in the fields.

To obtain a complete picture of changes in water quality in Ukraine, it is necessary to constantly monitor its quality using a larger number of indicators, considering the changes in the nature and intensity of shelling. It is advisable to use remote systems for monitoring the quality of water bodies, for example, chemical or physical sensors.

Keywords: monitoring; water quality; turbidity; content of iron compounds; content of manganese compounds; water crisis.

Fig.: 4. **References:** 16.

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-4(38)-245-253

УДК 621.311.24

Гліб Миколайович Стрункін

старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії «Промислова електроніка»
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потєбні Запорізького національного університету (Запоріжжя, Україна)
E-mail: strunkingleb@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>. ResearcherID: LNQ-2155-2024

АВТОНОМНА ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ НА БАЗІ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ФАЗНИМ РОТОРОМ ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ВІД ІНВЕРТОРА НАПРУГИ

Проведено аналіз методів підвищення ефективності перетворення вітрової енергії в електричну у вітроенергетичних установках. Розглянуто безмультиплікаторні схеми, що дозволяють підвищити ефективність аеромеханічного перетворення енергії вітру. Наведено історичні відомості розвитку систем з аеродинамічним мультиплікуванням. Виявлено перспективність використання систем з неповним перетворенням енергії. Запропоновано нову структуру автономної вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням на базі асинхронного генератора з фазним ротором зі збудженням від автономного інвертора напруги.

Ключові слова: автономна вітроенергетична установка, аеродинамічне мультиплікування, первинна вітротурбіна, вторинна вітротурбіна, асинхронний генератор із фазним ротором, автономний інвертор напруги.

Рис.: 2. Бібл.: 23.

Актуальність теми дослідження. Вирішення проблем автономного енергозабезпечення в Україні останнім часом стає дедалі більш актуальним. Намітилася тенденція до підвищення потужності таких джерел автономного енергоживлення. Одним із первинних джерел енергії систем автономного енергоживлення є енергія вітру. З розвитком схемотехніки перетворювачів та їхньої елементної бази максимальна потужність автономних вітроенергетичних установок (ВЕУ) зросла з 50-150 кВт до 500-750 кВт [1]. У теперішній час проєктуються автономні ВЕУ для віддалених районів Карпат, для острова Зміїний, для великих фермерських господарств [2].

Постановка проблеми. При побудові автономних систем енергоживлення виникає завдання підвищити ефективність перетворення вітрової енергії в електричну в вітроенергетичних установках для максимально повного використання електричного та аеромеханічного обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання підвищення ефективності перетворення вітрової енергії в електричну у вітроенергетичних установках традиційно поділяється на два напрямки: покращення ефективності механічних процесів ВЕУ [3; 4] і зменшення втрат, встановленої потужності [5; 6] та вартості електричного обладнання [7]. Ефективність механічних процесів вдається поліпшити шляхом відмови від аеромеханічного регулювання та використанні безмультиплікаторних схем [3]. Зменшити втрати та встановлену потужність електричного обладнання вдається з використанням схем із неповним перетворенням енергії, при якому використовується асинхронний генератор із фазним ротором (АГФР) та перетворювач частоти (ПЧ) у роторному ланцюзі генератора на потужність ковзання [5]. Знизити вартість можливо використанням серійної асинхронної машини, наприклад кранового двигуна, при цьому відсутня потреба проведення дослідно-конструкторських робіт зі створення спеціальних електричних машин [8]. Додатково знизити вартість електрообладнання можна за відсутності додаткового компенсатора реактивної потужності АГФР. Це вдається при використанні в складі ПЧ автономного інвертора напруги (АІН) [9].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз показав, що при поєднанні всіх цих заходів можливе комплексне поліпшення показників автономної ВЕУ.

Метою статті є побудова структурної схеми автономної ВЕУ з покращеною ефективністю перетворення вітрової енергії в електричну та визначення функцій її обладнання.

Виклад основного матеріалу. У традиційних ВЕУ горизонтального типу узгодження невеликої кутової швидкості обертання вітротурбіни з високою швидкістю обертання вала генератора здійснюється за допомогою мультиплікатора (підвищуючого редуктора) [3]. Причина вибору різних швидкостей для турбіни та генератора пов'язана з такими обставинами [3]:

- швидкість вітротурбіни великої потужності доцільно знижувати, враховуючи, що вони мають великий діаметр, який призводить до погіршення показників міцності при великих швидкостях обертання;

- швидкість обертання вала генератора доцільно підвищувати для зниження його масогабаритних показників.

Проте вже давно дослідники шукають можливості побудови так званих безредукторних схем. Причини, за якими бажана відмова від мультиплікатора, такі:

- надійність мультиплікатора залишається на досить невисокому рівні (середнє напруження на відмову редуктора у 2,5-3 рази менше, ніж для генератора) [10];

- найбільше шумове випромінювання ВЕУ пов'язане з роботою мультиплікатора [11];

- мультиплікатор залишається таким пристроєм, який потребує періодичного технічного обслуговування. Наприклад, автори [12] отримали експериментальну інформацію, що мультиплікатор ВЕУ з потужністю 500-1000 кВт потребує заміну мастила через кожні 1,5-2 роки. Погіршення герметичності кожуха мультиплікатора призводить також до забруднювання навколишнього середовища.

Альтернативою використанню мультиплікатора є встановлення у ВЕУ тихохідних генераторів, зокрема синхронних із постійними магнітами. Однак цей шлях виглядає сумнівним: зменшення швидкості обертання генератора з 1500 об/хв до 50 об/хв призводить до збільшення маси електричної машини з 478 кг до 1520 кг, тобто, більше ніж у 3 рази, що не може вважатися прийнятним в умовах автономних ВЕУ [13].

У теперішній час перспективним можна вважати використання аеродинамічного мультиплікування (АДМ).

Перша пропозиція побудови ВЕУ з АДМ ще у 1924 році була висунута А. Г. Уфимцевим, коли їм було запропоновано «вітродвигун з аеродинамічною передачею» [14]. Розвинули цю ідею Н. В. Красовський і Б. А. Васильєв для вітроенергетичних установок із синхронним генератором [15].

У США Ульріхом Хуттером також було запропоновано подібну схему [16].

Надалі тема аеродинамічного мультиплікування з'являлася лише в поодиноких публікаціях, серед яких потрібно вказати [17]. У роботі надані можливі енергетичні характеристики системи. Треба згадати, що автор роботи показав характер залежності вихідної потужності від швидкості вітру, таким чином, вперше описав ефект автооптимізації.

Наприкінці 2002 р. у ПФГ «Конкорд» (м. Дніпро, Україна) команда під керівництвом М. С. Голубенка розпочала створення принципово нової високоефективної ВЕУ з АДМ ТГ-750 потужністю 750 кВт. Основні відмінні риси вітротурбіни для ВЕУ з АДМ захищені патентом України № 49970 за заявкою 2000031794 від 30.03.2003 р. [18].

Слід зазначити, що напрямок ВЕУ з АДМ на теперішній час у практичному плані розвивається тільки в Україні командою М. С. Голубенка [19], П. Д. Андрієнка і Д. Г. Алексієвського [20] та у Великій Британії [21].

Особливістю вітротурбіни з АДМ є розміщення генераторів із вторинними вітротурбінами невеликої потужності в гондолах на лопатях великої первинної вітротурбіни (рис. 1).

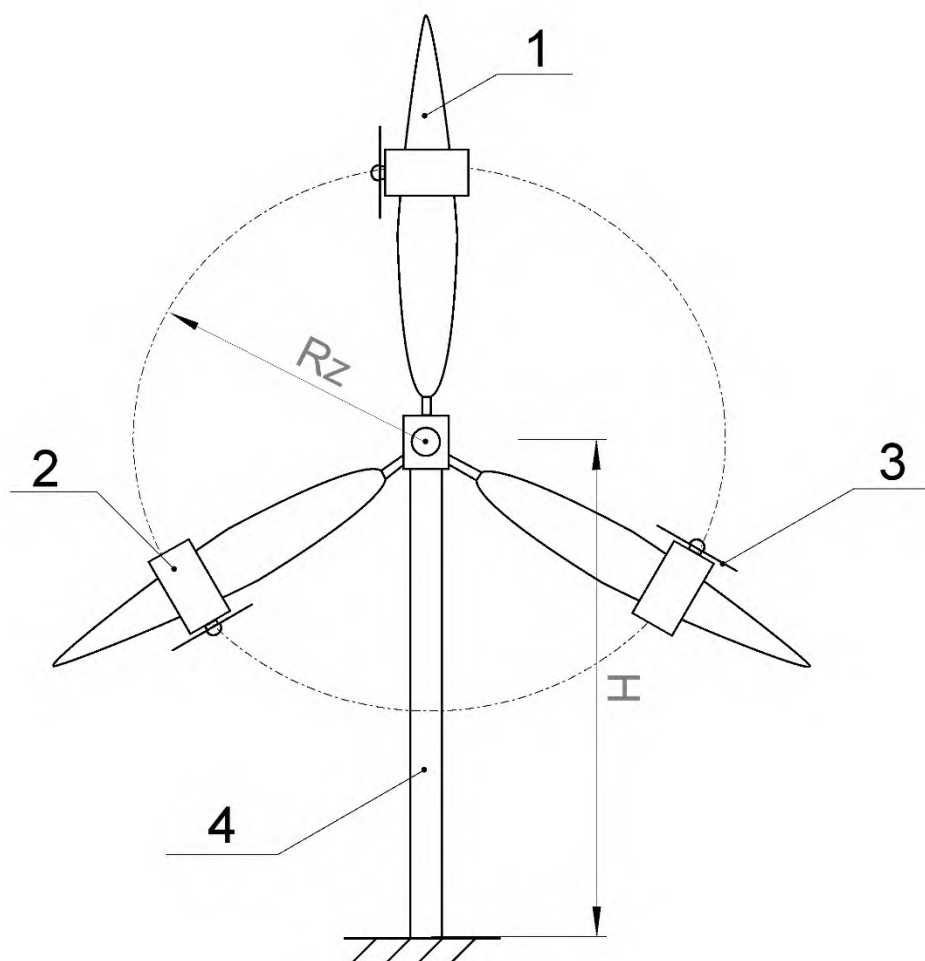


Рис. 1. Схема вітротурбіни з АДМ:

1 – лопаті первинної вітротурбіни; 2 – гондола з генератором та електрообладнанням; 3 – вторинні вітротурбіни; 4 – опора; Rz – радіус закріплення вторинної вітротурбіни; H – висота вісі первинної вітротурбіни

Джерело: розроблено автором.

Вітер, обметаючи лопаті первинної вітротурбіни, приводить її в рух. Первинна вітротурбіна є пасивною, тобто її вісь не підключено до генератора. Тангенціальна складова швидкості руху гондoli з вторинною вітротурбіною пропорційна радіусу її закріплення Rz . Таким чином, при швидкості обертання первинної вітротурбіни 16 об/хв (1,68 рад/с), та $Rz = 13$ м, тангенціальна швидкість руху вторинної вітротурбіни становитиме $1,68 \times 13 = 21$ м/с. Таким приблизно стане еквівалентна швидкість вітру для вторинної вітротурбіни. Очевидно, що в цьому випадку вторинна вітротурбіна може бути маленькою та обертатися зі швидкістю 400-600 об/хв і вище, що задовольнятиме вимогам для відмови від мультиплікатора. Отже, використання більш складної вітротурбіни дозволяє підвищити обороти на валу генераторів без наявності механічного мультиплікатора. Такий метод називають аеродинамічним мультиплікуванням [20].

У минулому ВЕУ з АДМ знаходили застосування лише в системних установках, але підвищення щодо вимог до потужності автономних ВЕУ відкриває можливість задіяти цей метод і в них.

Поєднавши переваги ВЕУ з АДМ з системами з неповним перетворенням енергії на базі АГФР, вдається поліпшити як механічні, так і електричні показники ВЕУ.

Для роботи АГФР необхідне джерело змінної напруги. Це може бути синхронний генератор, що приводиться в рух двигуном внутрішнього згорання, або перетворювач на базі автономного інвертора. До такого джерела ставляться такі вимоги:

- забезпечення необхідної якості напруги в мережі (наприклад, відповідно до чинних стандартів);

- можливість роботи з несиметричним навантаженням;

- можливість компенсації реактивної потужності АГФР і навантаження.

Крім інших переваг, системам з АГФР властива можливість роботи як у надсинхронному, так і в підсинхронному режимах [6]. Недоліком є наявність в АГФР контактних кілець, що знижують надійність машини. Цей недолік може бути усунутий застосуванням машин безконтактних кілець, що призводить до погіршення масогабаритних показників машини.

У наш час електрообладнання ВЕУ з АГФР виконується за різними схемами [6; 9; 22], але в автономних ВЕУ простішим виявляється застосування перетворювачів із ланкою постійного струму й автономним інвертором [9].

За наявності автономного інвертора напруги проблема компенсації реактивної потужності й підтримки балансу активної вирішується автоматично, що зумовлено властивостями інвертора напруги. Такі властивості АІН дозволяють використовувати його як компенсатор реактивної потужності, джерела змінної напруги для формування мережі та статорного перетворювача одночасно. Недоліком цієї системи є наявність у ланці постійного струму значної високовольтної ємності, величина якої повинна бути обрана з урахуванням впливу навантаження і перетворювача в ланці постійного струму.

Слід зазначити, що при використанні некерованого роторного випрямляча неможлива робота в підсинхронному генераторному режимі [6], що знижує діапазон робочих швидкостей вітру (діапазон регулювання становить приблизно 2:1 [6]). Однак відомо [3], що при зменшенні швидкості вітру вдвічі потужність знижується у $2^3 = 8$ разів. Отже, глибше регулювання практично потрібно рідко.

Таким чином, підвищення ефективності перетворення вітрової енергії в електричну досягається за рахунок:

- підвищення ККД у механічному тракті за рахунок відмови від мультиплікатора;

- зниження витрат на періодичну заміну мастила в мультиплікаторі;

- підвищення ККД у ланцюгах керування генератором через меншу встановлену потужність перетворювача частоти;

- зниження вартості первинної вітротурбіни через відмову від зміни кута встановлення її лопатей;

- відсутність вимог щодо використання спеціального компенсатора реактивної потужності.

Додатково можливе зменшення вартості на розробку автономної системи, якщо використати серійний асинхронний двигун у генераторному режимі.

Запропоновану схему автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР зі збудженням від інвертора напруги представлено на рис. 2.

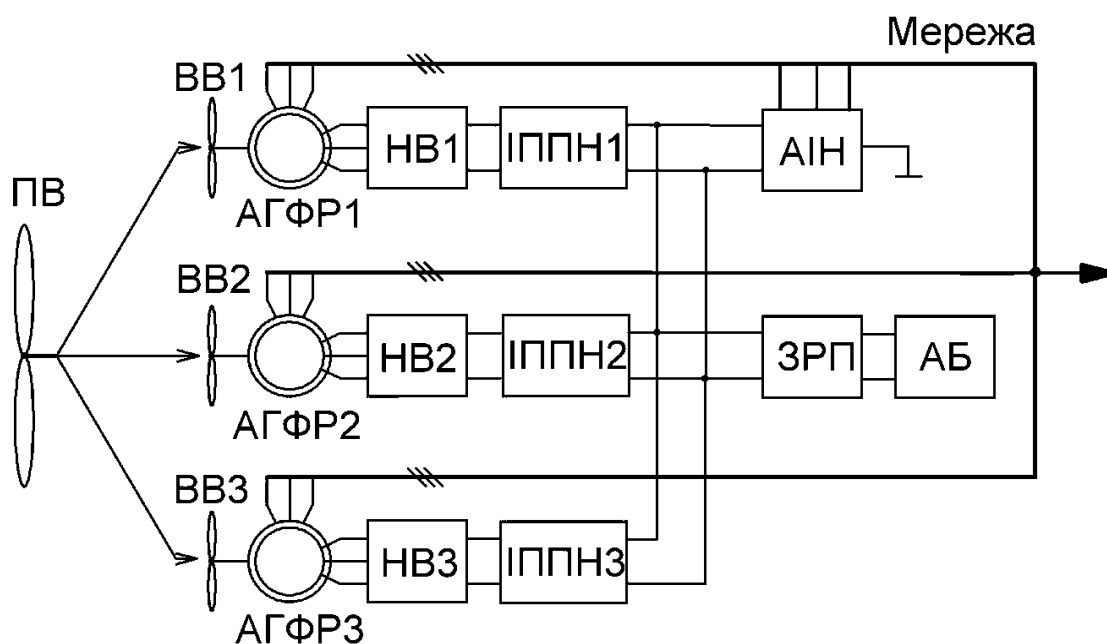


Рис. 2. Схема автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР

Джерело: розроблено автором.

Система працює таким чином. За наявності вітру первинна вітротурбіна ПВ із незмінним кутом встановлення лопатей створює вітровий потік для вторинних вітротурбін ВВ1...ВВ3, які обертають асинхронні генератори з фазним ротором АГФР1...АГФР3. Енергія знімається як з боку статора кожного генератора, так і з боку ротора (енергія ковзання) через індивідуальний некерований випрямляч НВ1...НВ3. Коли швидкість вітру перевищує номінальну, можливо зменшення моменту шляхом регулювання проти-ЕРС імпульсного перетворювача постійної напруги ІППН1...ІППН3, який є навантаженням некерованих випрямлячів. Енергія ковзання використовується також для підзарядки акумуляторної батареї АБ. Струм заряджання АБ формується зарядно-розрядним пристроєм ЗРП. При недостатній швидкості вітру, коли потужності, що генерується недостатньо, а також при пуску, здійснюється перехід на живлення від акумуляторної батареї. У цьому випадку ЗРП стабілізує напругу в ланцюзі постійного струму. У будь-якому разі формування мережі змінного струму та збудження генераторів відбувається автономним інвертором напруги АІН. Система керування повинна мати 3 канали: індивідуальне завдання моменту кожного АГФР шляхом зміни коефіцієнта заповнення ІППН, стабілізація напруги в ланцюгах постійного струму та формування струму заряджання для АБ шляхом зміни коефіцієнта заповнення ЗРП та формування та стабілізацію змінної напруги мережі шляхом широтно-імпульсної модуляції в АІН.

Система має високу гнучкість, бо дозволяє використовувати підключення інших джерел енергії, наприклад, сонячної батареї або дизель-генератора.

Вимогою незалежної роботи кожного ІППН повинно бути їх стабільна проти-ЕРС, яку формує ЗРП.

До автономних інверторів, призначених до створення автономних ВЕУ на базі АГФР, ставлять такі вимоги:

- 1) забезпечення необхідної якості змінної напруги (коефіцієнт гармонік у номінальному режимі не більше ніж 5 % [23]);
- 2) можливість роботи з несиметричним навантаженням та навантаженням, здатним змінюватися в широких межах [23];

- 3) компенсація реактивної потужності навантаження та АГФР;
- 4) добрі масогабаритні показники.

Через свою зворотність [22] АІН дозволяє передавати енергію як від ланки постійного струму в навантаження, так і у зворотному напрямку, що має місце при надлишку потужності, що генерується, або рекуперативному навантаженні. Отже, вирішується проблема підтримки активної потужності системі, коли її надлишок запасється в АБ.

У науково-дослідній лабораторії «Промислова електроніка» Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету проводиться подальша робота зі створення математичних моделей автономних ВЕУ з АДМ та створення методики їх розрахунку. Детальний аналіз потоків енергії та моделювання роботи автономної ВЕУ - тема наступних публікацій.

Висновки. У статті проведено аналіз можливих методів підвищення ефективності перетворення вітрової енергії в електричну в автономних ВЕУ. Запропоновано структуру автономної ВЕУ з АДМ, яка відповідає поставленій меті. Покращення ефективності перетворення вітрової енергії в електричну вдається досягти шляхом підвищення ККД у механічному обладнанні через вилучення мультиплікатора та використання для керування режимом ВЕУ ПЧ з неповним перетворенням енергії. Регулювання моменту на валу генератора здійснюється в ланцюгу його ротора імпульсним перетворювачем, а формування мережі відбувається від автономного інвертора напруги. Наявність акумулювальної батареї та інвертора напруги надає всієї системі рис джерела безперервного живлення. Через те, що така структура ВЕУ запропонована вперше, автор направив на розгляд заявку на корисну модель.

Список використаних джерел

1. Rahman, M. M. A. Decentralized wind-PV-diesel based hybrid power generation / M. M. Atiqur Rahman, Ali T. Al Awami // In 2nd International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, ICEEICT 2015. – Article 7307472. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEEICT.2015.7307472>.
2. Вітроенергетичний сектор України. Огляд ринку [Електронний ресурс] / Г. Шмідт, А. Конеченков, М. Грицишина, М. Сисоєв, К. Книш, М. Савчук; за заг. ред. канд. техн. наук І. В. Плачкова, А. Є. Конеченкова. – Режим доступу: https://uwea.com.ua/uploads/reviews/uwea_2019_ua_preview.pdf.
3. Patel, M.R. Wind and solar power systems / M. R. Patel. – CRC Press, Boca Raton, 1999. – 283 p.
4. Sorensen J.D. Wind Energy Systems – Optimization Design and Construction for Safe and Reliable Operation / John Dalsgaard Sorensen, Jens N Sorensen. – 1st editions. – Woodhead Publishing Limited. Sawston, Cambridge, UK, 2011. – 616 p.
5. Iov, F. Analysis of a Variable-Speed Wind Energy Conversion Scheme with Doubly Fed Induction Generator / F. Iov, F. Blaabjerg, A. D. Hansen // International Journal in Electronics. – 2003. – Vol. 90. – №. 11-12. – Pp. 779-794.
6. Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation / G. Abadi, J. Lopez, M. Rodriguez, L. Marroyo, G. Iwanski. – 1st ed.; John Wiley and Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, – 2011.
7. Перминов, Ю. Н. Сравнение вариантов конструкций синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для ветроустановок / Ю. Н. Перминов, Е. А. Монахов // *Відновлювана енергетика*. – 2019. – № 2. – С. 54-60. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).54-60](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).54-60).
8. Об использовании крановых асинхронных двигателей в качестве генераторов для автономных ВЭУ / А. В. Переверзев, Д. Г. Алексеевский, В. В. Семенов, А. Н. Буров, Г. Н. Стрункин, А. В. Таранец // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2008. – № 1. – С. 20-23.
9. Патент на корисну модель №26494 Україна, МПК H02K 17/34 (2007.01). Автономна вітроелектрогенеруюча система / Д. Г. Алексієвський, О. М. Буров, К. І. Веселов, Н. А. Омельчук, А. В. Переверзев, В. В. Семенов, Г. М. Стрункін, А. В. Таранець. – Заявлено 11.05.2007; Опубл. 25.09.2007. Бюл. № 15.

10. Caichao Z. Reliability Analysis of Wind Turbines / Zhu Caichao, Yao Li // Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines. – Australia, 2018. – Pp. 169-186. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.74859>.
11. Pohl, J. Understanding stress effects of wind turbine noise – the integrated approach / J. Pohl, J. Gabriel, G. Hübner // Energy Policy. – 2018. – Vol. 112. – Pp. 119-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.007>.
12. Ranjan, R. Experimental and statistical analysis of wear on gear material / R. Ranjan, S. Kumar, SK. Ghosh, M. Kumar // Lubrication Science. – 2023. – Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1002/ls.1650>.
13. Wu, W. A low speed, high-torque, direct-drive permanent magnet generator for wind turbines / W. Wu, V.S. Ramsden, T. Crawford, G. Hill // Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129). – Rome, Italy, 2000. –Vol. 1. – Pp. 147-154. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2000.881049>.
14. Патент СССР №1457, Класс 88-с. Ветроэлектрический генератор / А. Г. Уфимцев. – Заявл. 14.01.1924; опубл. 31.07.1926.
15. Красовский, Н. В. Схема ветряного двигателя с аэродинамической передачей для мощностей 100-3.000 кв / Н. В. Красовский // Известия ОГИН. – 1939. – № 5. – 15 с.
16. Патент на винахід US4197056, МПК F03D 1/00, F03D 11/04. Wind-driven power plant / Ulrich Hutter; заявник і патентовласник Ulrich Hutter. – US 05/935558, заявл. 21.08.1978; опубл. 08.04.1980.
17. Патент на винахід EP 1 390 615, МПК F03D 1/02, F03D 11/00. WIND TURBINE HAVING SECONDARY ROTORS / Helge Aagaard Madsen, Flemming Rasmussen; заявник і патентовласник Technical University of Denmark 2800 Lyngby (DK). – 02735087.5, заявл. 29.11.1990; опубл. 30.08.2008. Бюл. № 18.
18. Патент на винахід UA49970, МПК F03D 1/00. Вітродвигун / М. С. Голубенко, О. Л. Кадацький, В. С. Легеза, В. О. Циганов, С. І. Лось, Г. В. Гальмаков; заявник і патентовласник Державне конструкторське бюро 255 «Південне» ім. М. К. Янгеля. – № 2000031794, заявл. 30.03.2002; опубл. 15.10.2002, Бюл. № 10.
19. Голубенко, Н. С. Ветровая электрическая турбогенераторная установка ТГ-750 / Н. С. Голубенко, В. Е. Олишевская, С. Д. Курдюков, Г. С. Олишевский, С. С. Курдюков // Наука та інновації. – 2008. – Т. 4, № 6. – С. 71-77. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin4.06.071>.
20. Алексієвський, Д. Г. Синтез електромеханічних систем вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням: дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.03 / Алексієвський Дмитро Геннадійович ; Запорізький національний університет. – Запоріжжя, 2020. – 331 с.
21. Morgan, L. On the use of secondary rotors for vertical axis wind turbine power take off / L. Morgan, W. Leithead, J. Carroll // Wind Energy. – 2024. – № 27(6). – С. 569-582. DOI: <https://doi.org/10.1002/we.2901>.
22. Стрункін, Г. М. Застосування пристроїв силової електроніки / Г. М. Стрункін. – Дніпро : Середняк Т. К., 2024. – 407 с.
23. ДСТУ ІЕС 62040-3:2004. Агрегати безперебійного живлення. Частина 3. Загальні технічні вимоги. Методи випробовування. – Чинний від 2025-01-01. – Вид. офіц.

References

1. Rahman, M. M. A., & Al Awami, A. T. (2015). Decentralized wind-PV-diesel based hybrid power generation. In 2nd International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, iCEEICT 2015 Article 7307472 (2nd International Conference on Electrical Engineering and Information and Communication Technology, iCEEICT 2015). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ICEEICT.2015.7307472>.
2. Plachkov, I.V., Konechenkova, A. Ye. (2019). Vitroenerhetychnyi sektor Ukrainy. Ohliad rynku [Wind energy sector of Ukraine. Market overview]. https://uwea.com.ua/uploads/reviews/uwea_2019_ua_preview.pdf.
3. Patel, M.R. (1999). *Wind and solar power systems*. CRC Press, Boca Raton.
4. Sorensen, J.D., Sorensen, J.N. (2011). *Wind Energy Systems – Optimization Design and Construction for Safe and Reliable Operation*. Woodhead Publishing Limited. Sawston, Cambridge, UK.

5. Iov, F., Blaabjerg, F., Hansen, A.D. (2003). Analysis of a Variable-Speed Wind Energy Conversion Scheme with Doubly Fed Induction Generator. *International Journal in Electronics, Taylor & Francis Ltd*, 90(11-12), 779-794.
6. Abadi, G., Lopez, J., Rodriguez, M., Marroyo, L., Iwanski, G. (2011). *Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation*. 1st ed.; John Wiley and Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA.
7. Permynov, Y., & Monakhov, E. (2019). Sravnenie variantov konstruktсии sinkhronnykh generatorov s vozbuzhdeniem ot postoiannykh magnitov dlia vetrustanovok [Design comparison of synchronous permanent magnet generator for wind turbines]. *Vidnovluyana Energetika – Renewable energy.*, (2(57), 54-60. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).54-60](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).54-60).
8. Pereverzev, A.V., Alekseevsky, D.G., Semenov, V.V., Burov, A.N., Strunkin, G.N., Taranets, A.V. (2008). Ob ispolzovanii kranovykh asinkhronnykh dvigatelei v kachestve generatorov dlia avtonomnykh VEU [On the use of crane induction motors as generators for autonomous WPP]. *Elektrotehnika ta elektroenerhetyka – Electrical engineering and electrical energy*, (1), 20-23.
9. Aleksievskiy D.G., Burov O.M., Veselov K.I., Omelchuk N.A., Pereverzev A.V., Semenov V.V., Strunkin H.M., Taranets A.V. (2007). Avtonomna vitroelektroheneruiucha systema [Autonomous wind power generating system]. Utility model patent No. 26494 Ukraine, IPC N02K 17/34 (2007.01).
10. Zhu, Cai-chao and Yao Li. “Reliability Analysis of Wind Turbines.” *Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines* (2018): n. pag. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.74859>.
11. Pohl, J., Gabriel, J., Hübner, G. (2018). Understanding stress effects of wind turbine noise – the integrated approach. *Energy Policy*, 112, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.007>.
12. Ranjan, R., Kumar, S., Ghosh, S.K., Kumar, M. (2023). Experimental and statistical analysis of wear on gear material. *Lubrication Science*. 1-11. <https://doi.org/10.1002/lis.1650>.
13. Wu, W., Ramsden, V.S., Crawford, T., Hill, G. (2000). A low speed, high-torque, direct-drive permanent magnet generator for wind turbines. *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy* (Cat. No.00CH37129), Rome, Italy, pp. 147-154 vol. 1. <https://doi.org/10.1109/IAS.2000.881049>.
14. Ufimtsev, A.G. (1926). Vetroelektricheskii generator [Wind-powered generator]. USSR Patent No. 1457, Class 88-c.
15. Krasovsky, N.V. (1939). Skhema vetrinohoho dvyhatelia s aerodynamycheskoi peredachei dlia moshchnosti 100-3.000 kv [Wind turbine diagram with aerodynamic transmission for capacities of 100-3,000 kW]. *Izvestia OGIN*. (5).
16. Ulrich Hutter. (1980). *Wind-driven power plant*. Patent US4197056, MIIK F03D 1/00, F03D 11/04.
17. Patent EP 1 390 615, MIIK F03D 1/02, F03D 11/00. WIND TURBINE HAVING SECONDARY ROTORS / Helge Aagaard Madsen, Flemming Rasmussen; Technical University of Denmark 2800 Lyngby (DK).
18. Golubenko M.S., Kadatskiy O.L., Legeza V.S., Tsyganov V.O., Los S.I., Halmakov G.V. (2002). Patent for the invention UA49970, IPC F03D 1/00. Wind engine.
19. Golubenko M.S., Olishevskaya V.E., Kurdyukov S.D., Olishevskiy G.S., Kurdyukov S.S. (2008). Vetrovaia elektrycheskaia turbogenera-tornaia ustanovka TH-750 [Wind electric turbo-generator TG-750]. *Science and innovation*, (6), 71-77. <https://doi.org/10.15407/scin4.06.071>.
20. Alekseevskiy, D.G. (2020). *SynteZ elektromekhanichnykh system vitroenerhetychnykh ustanovok z aerodynamichnym multiplykuvanniam [Synthesis of wind power plants elec-tromechanical systems with aerodynamic multiplication]* [Doctor dissertation].
21. Morgan, L., Leithead, W., & Carroll, J. (2024). On the use of secondary rotors for vertical axis wind turbine power take off. *Wind Energy*, 27(6), 569-582. <https://doi.org/10.1002/we.2901>.
22. Strunkin, H.M. (2024). *Zastosuvannia prystroiv sylovoi elektroniky [Application of power electronics devices]*. Serednyak T. K.
23. DSTU IES 62040-3:2004. Ahrehaty bezperebiinoho zhyvlennia. Chastyna 3. Zahalni tekhnichni vymohy. Metody vyprovovuvannia [IEC 62040-3:1997 Uninterruptible power systems (UPS) - Part 3: Method of specifying the performance and test requirements].

Отримано 23.10.2024

Hlib Strunkin

senior researcher of the research laboratory "Industrial Electronics"
Engineering Institute of Zaporizhzhia National University.

e-mail: strunkingleb@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>. ResearcherID: [LNQ-2155-2024](https://orcid.org/0009-0009-1719-4132)

AUTONOMOUS WIND POWER PLANT WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION BASED ON ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH A PHASE ROTOR WITH EXCITATION FROM A VOLTAGE-SOURCE INVERTER

The article analyzes the methods of increasing the efficiency of converting wind energy into electricity in wind power plants. It is noted that there are both aero-mechanical and electrical methods of increasing the efficiency of converting wind energy into electricity. Multiplierless schemes that allow to increase the efficiency of aero-mechanical conversion of wind energy are considered. These include the use of low-speed generators and aerodynamic multiplication. Aerodynamic multiplication is considered promising and more acceptable for high-power autonomous wind power plants, considering that low-speed generators have poor mass-dimensional indicators. Historical information on the development of systems with aerodynamic multiplication is given. Similar systems are currently being developed only in Ukraine, where the experimental operation and implementation of the TG-750 industrial model have been carried out, and in the United Kingdom. The perspective of using systems with incomplete energy conversion has been revealed. The improvement of indicators is determined by the use of a slip power converter of an asynchronous generator with a phase rotor and a voltage-source inverter. A new structure of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on an asynchronous generator with a phase rotor with excitation from a voltage-source inverter is proposed. Information on the operation of the system is provided. The use of a voltage-source inverter allows you to abandon an additional source of alternating voltage for an asynchronous generator with a phase rotor and provide the system with the features of an uninterrupted power source. The considered structure of the autonomous wind power plant is presented in the utility model application.

Keywords: autonomous wind power plant; aerodynamic multiplication; primary wind turbine; secondary wind turbine asynchronous generator with a phase rotor; voltage-source inverter.

Fig.: 2. References: 23.

Сергій Володимирович Зайцев, Віктор Панасович Кишневський

¹кандидат технічних наук, інженер кафедри атомних електростанцій
Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)
E-mail: sdjavdet@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

²доктор технічних наук, професор кафедри атомних електростанцій
Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)
E-mail: kishnevskiy@op.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1780-2969>

**ПРОЦЕСНИЙ ПІДХІД ДО ДІАГНОСТУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ ОЛИВОНАПОВНЕНОГО
ОБЛАДНАННЯ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ**

Стаття є оглядовою. У цьому дослідженні розглянуто основні стани технологічних середовищ під час їх експлуатації в оливонаповненому обладнанні енергопідприємств, зокрема в підрозділах атомної електростанції (АЕС). Як технологічне середовище розглянуто газоподібні, рідкі, тверді речовини або їх суміші, що знаходяться в оливонаповненому обладнанні для забезпечення його функціонування в таких видах його оперативних станів, як робота за призначенням, резервування, консервація, технічне обслуговування і ремонт, або видаляються з цього обладнання примусово або мимоволі в інше обладнання або в навколишнє середовище. До таких технологічних середовищ віднесено, зокрема, трансформаторні й турбінні оливи, охолоджуюча вода, газоподібний водень. Отримані результати дозволяють: удосконалити процесний підхід до діагностування газоподібних, рідких, твердих технологічних середовищ у процесі їх експлуатації в оливонаповненому обладнанні АЕС України на підставі результатів визначення показників якості цих технологічних середовищ; підвищити достовірність такого діагностування з урахуванням станів технологічних середовищ в оливонаповненому обладнанні. Удосконалено принципову схему розподілу технологічних середовищ в турбогенераторі типу ТВВ з водневим охолодженням ротора і статора та водяним охолодженням обмотки статора.

Ключові слова: технологічні середовища; трансформаторні і турбінні оливи; газоподібний водень; оливонаповнене обладнання; процесний підхід; діагностування; атомна електростанція.

Рис.: 6. Бібл.: 26.

Актуальність теми дослідження. Розвиток України у сфері економічної діяльності викликає попит на такі енергетичні ресурси, як електрична енергія і тепло, виробництво, передача і споживання яких регламентовано Законом України «Про ринок електричної енергії». У енергетичному обладнанні атомних електростанцій (АЕС) використовуються такі технологічні середовища, як енергетичні оливи: турбінні (ТуО), трансформаторні (ТрО), трансмісійні, індустріальні, гідравлічні, компресорні, вакуумні, а також мастила загального застосування [1; 2]. Ці оливи можна розглядати як елемент конструкції обладнання, який дозволяє йому виконувати проєктні функції, що своєю чергою потребує виконання вимог щодо експлуатаційної стабільності й відповідного експлуатаційного ресурсу цих олив. Найбільший обсяг енергетичних олив, що експлуатують в оливонаповненому обладнанні АЕС, належить ТрО і ТуО. В обладнанні АЕС: а) ТуО застосовують у системах змащування та управління парових турбін і гідроагрегатів, змащування та ущільнення валу електрогенераторів, підйому ротора турбоагрегатів, змащування вузлів головних циркуляційних насосів, змащування вузлів турбоживильних насосів та в іншому насосному обладнанні, змащування вузлів дизельних електростанцій власних потреб, змащування вузлів компресорного і холодильного устаткування, змащування вузлів газотурбінної електроустановки; б) ТрО застосовують в трансформаторному обладнанні [2]. В оливонаповненому обладнанні України як технологічне середовище, крім енергетичних олив, використовують також газоподібні, рідкі, тверді речовини (водень, вода, адсорбенти та інші), стан яких впливає на технічний стан оливонаповненого обладнання. На підставі процесного підходу з урахуванням вимог до компетентності випробувальних лабораторій АЕС можлива організація діагностування технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС, які постійно удосконалюються [1; 3]. Тому постійне удосконалення процесного підходу до діагностування технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС є актуальним.

Постановка проблеми. Розглядання енергетичних олиив як елементів конструкції олиивонаповненого обладнання потребує виконання вимог щодо їх експлуатаційної стабільності й відповідного експлуатаційного ресурсу. Це може бути досягнуто за рахунок удосконалення елементів системи діагностування технологічних середовищ, які застосовують в олиивонаповненому обладнанні та можуть впливати одне на одного. Надійність такої системи діагностування технологічних середовищ олиивонаповненого обладнання може бути забезпечена за рахунок удосконалення процесного підходу до діагностування технологічних середовищ олиивонаповненого обладнання АЕС. У наш час процеси модернізації олиивонаповненого обладнання АЕС є постійними та необхідними, що потребує розширювати вимоги до діагностування технологічних середовищ для визначення та прогнозування їхнього стану [4]. Таким чином, є необхідність у постійному удосконаленні процесного підходу до діагностування технологічних середовищ олиивонаповненого обладнання АЕС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [5] показано, що олиивонаповнене енергетичне обладнання – тепломеханічне, гідромеханічне та електротехнічне обладнання загального призначення, у технологічних системах якого олииви використовуються як робоча рідина.

У роботах [1; 2] показано, що: а) в обладнанні АЕС України на даний час знаходяться в експлуатації ТуО: мінеральні – марок Тп-22, Т-22С, Тп-22Б, Енергоойл Тп-22с, Агрінол Тп-22, Агрінол Тп-22с, Агрінол Тп-30, Агрінол Тп-46; синтетичні вогнестійкі турбінні олииви (СВТО) – марок Reolube®ОМТІ, Reolube®46RS, Fyrquel®L, Енергоойл Турбо 46; б) під час експлуатації олиивонаповненого обладнання АЕС часто відбувається модернізація обладнання [4] та застосування нових технологічних середовищ [1]. Наприклад: а) в енергоблоках № 1 і № 2 Хмельницької АЕС на даний час застосовано ТуО марок «Reolube®ОМТІ», «Reolube®46 RS», а раніше використовувалися рідини «ОМТІ», «Fyrquel®L»); б) в енергоблоці № 3 Південно-Української АЕС на даний час застосовано ТуО марки «Reolube®ОМТІ», а раніше в експлуатації була суміш ТуО марки «Fyrquel®L» (80 % маси) і марки «Reolube®ОМТІ» (20 % маси) [1].

У роботі [6] показано, що в трансформаторному обладнанні АЕС України на даний час можуть знаходитися в експлуатації ТрО: а) мінеральні – марок ГК, Т-1500, Т-1500У, Т-750, ТКп, Nytro10XN(10X), Nytro11GBX(11GX), Shell Diala S4 ZX-1; синтетична – марки HyVolt III.

У роботі [7] відзначено, що: технологічне середовище – тверді, рідкі, газоподібні і багатофазні об'єкти, активно або пасивно використовувані в технологічному процесі виробництва або/і застосування продукції; якість технологічного середовища – ступінь придатності технологічного середовища до застосування при транспортуванні, зберіганні, використанні за призначенням, регенерації, і яке визначають за допомогою значень ряду показників, обумовлених відповідними нормативними документами.

В роботах [8; 9] наведено основні вимоги до таких показників якості технологічних середовищ (мінеральних ТуО і СВТО) олиивонаповненого обладнання АЕС, як: кінематична в'язкість; температури спалаху у відкритому тиглі; кислотне число; вміст водорозчинних кислот; масова частка води; масова частка механічних домішок; клас промислової чистоти; рН водної витяжки; число деемульсації; вміст розчиненого шламу; антикорозійні властивості; схильність до піноутворення; час деаерації; стабільність до окиснення; об'ємний вміст повітря.

У роботах [6; 10] наведено основні вимоги до таких показників якості технологічних середовищ (мінеральних і синтетичних ТрО) олиивонаповненого обладнання АЕС, як: густина; кінематична в'язкість; температури спалаху в закритому тиглі; температура застигання; кислотне число; вміст водорозчинних кислот; масова частка води; масова частка

механічних домішок; клас промислової чистоти; рН водної витяжки; наявність механічних домішок; наявність нерозчиненої води; вміст протиокисної присадки «Іонол»; вміст фуранових сполук; антикорозійні властивості; натрова проба; прозорість; колір; показник заломлення; вміст сірки; розчинений і нерозчинений осад (шлам); стабільність проти окиснення; об'ємний вміст повітря (газовміст); вміст розчинених газів; пробивна електрична напруга; тангенс кута діелектричних втрат.

У роботах [11–13] наведено основні вимоги до показників якості таких технологічних середовищ під час технічної експлуатації турбогенератора з водневим охолодженням та його вузлів (поплавковому гідрозаслоні, бачку продування і водневідокремлювальному баку оливоочищувального пристрою, картерах підшипників, в екранованих струмопроводах, у кожухах лінійних і нульових виводів) та допоміжного обладнання, як: газоподібний водень (вміст: водню, кисню, продуктів піролізу електричної ізоляції обмотки статора, вільних газів, пару води, пару TuO , добове витікання водню за робочого тиску в турбогенераторі); інертний газ – азот (вміст: водню, кисню); охолоджуюча вода для теплообмінників типу « TuO – вода» (вміст TuO у воді); охолоджуюча вода для теплообмінників типу «водень – вода» (вміст водню у воді); охолоджуюча знесолена вода (дистилят) у системі охолодження обмотки статора турбогенератора (вміст водню у дистиляті).

У роботі [14] наведено основні вимоги до якості технологічного середовища обладнання другого контуру АЕС, які встановлюють способи корекційної обробки робочого середовища обладнання другого контуру; норми якості робочого середовища на стадіях пуску після реконструкції, пусків після зупинення роботи обладнання другого контуру АЕС, під час експлуатації; межі і рівні дії при відхиленні нормованих показників якості технологічного середовища; вимоги до засобів і методів забезпечення водно-хімічного режиму; вимоги до засобів і обсягу хімічного контролю якості технологічного середовища.

У роботах [6; 10; 15] наведено основні вимоги до якості технологічних середовищ – адсорбентів та іонообмінних смол – розмір гранул, вологовміст та інше.

У роботах [6; 10] відзначено, що для TrO : а) стан TrO – це характеристика певної якості TrO за сукупністю властивостей, які зазнають змін у процесі зберігання та експлуатації; б) якість TrO – це ступінь придатності TrO , яку визначають за допомогою значень ряду показників, зумовлених відповідними нормативними документами; в) надано такі терміни та визначення понять, як: свіжа олива, експлуатаційна олива, регенована олива, підготовлена до заливання (доливання) олива, очищена олива, регенерація оливи.

У роботах [5; 8; 9] відзначено, що для TuO надано такі терміни та визначення понять, як: нафтопродукт; нафтова (мінеральна) TuO ; некондиційний нафтопродукт; регенована олива; СВТО; спрацьований нафтопродукт; TuO ; деаерація оливи; експлуатаційна олива; шлам оливи; олива відновленої якості; оливна піна; присадка; продукти старіння оливи; свіжа олива; система змащування. У цих же роботах наведено: а) вимоги до якості, умов приймання та зберігання TuO для енергетичного обладнання АЕС; б) технічні вимоги до процедури введення TuO в експлуатацію; в) технічні вимоги до якості TuO в процесі експлуатації; г) перелік показників якості TuO , за якими приймається рішення про відновлення якості або виведення з експлуатації. Вимоги цих робіт поширюється на всі технологічні процеси АЕС, які пов'язані з експлуатацією TuO , зокрема в системах змащування і регулювання парових турбін, системах змащування і ущільнення валів генераторів, системах змащування головних циркуляційних насосів та насосів системи охолодження води, системах змащування конденсатних електронасосів, насосів перекачування технічної води відповідальних та невідповідальних споживачів, системах змащування та регулювання турбоживильних насосних агрегатів і насосів відкачування сепарату.

У роботі [16] відзначено, що: 1) технічне діагностування проводять із метою контролю технічного стану об'єкта; 2) у процесі технічного діагностування вирішують такі задачі: виявляють дефекти, пошкодження та відмови складових частин та об'єкта зага-

лом, вивчають причини, механізми, умови їх виникнення та розвитку; оцінюють працездатність за сукупністю властивостей об'єкта, які зазнають змін у процесі експлуатації, та прогнозують технічний стан на наступний період експлуатації; оцінюють достатність передбачених у системі регламентованого технічного обслуговування контрольних та профілактичних заходів, направлених на запобігання відмовам в експлуатації, визначають обсяг, методи та періодичність технічного огляду.

У роботі [3]: а) визначено загальні вимоги до компетентності, неупередженості та стійкого функціонування лабораторій. Ці вимоги застосовується до будь-яких організацій, що здійснюють лабораторну діяльність, незалежно від чисельності персоналу. Замовники лабораторії, регуляторні органи, організації, що використовують експертну оцінку, органи з акредитації та інші використовують ці вимоги для підтвердження або визнання компетентності лабораторій; б) показано можливе схематичне представлення операційних процесів лабораторії. Ці вимоги можуть бути застосовані для діагностування станів технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС.

У роботі [11] показано, що обсяги і терміни проведення вимірювань та випробувань електрообладнання, яке знаходиться в експлуатації, можуть змінюватися за рішенням керівника з технічних питань підприємства з урахуванням технічного стану електроустановок, терміну їхньої служби та результатів діагностування електрообладнання, і це може бути застосовано при удосконаленні технологічних схем оливонаповненого обладнання АЕС в частині додаткового відбору проб технологічних середовищ із цього обладнання для діагностування стану технологічних середовищ та обладнання.

У роботі [17] досліджено основні принципи та вимоги до функціонування елементів системи управління надійністю оливонаповненого електрообладнання електричних станцій і мереж, в тому числі основні вимоги до програми забезпечення надійності та до системи моніторингу стану цього обладнання. Ці результати можуть бути застосовано для забезпечення надійності та достовірності діагностування технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Результати досліджень джерел інформації щодо методів діагностування електротехнічного обладнання та технологічних середовищ в процесі їх експлуатації в електротехнічному оливонаповненому обладнанні енергопідприємств України, показали, що на даний час не достатньо повно застосовано процесний підхід до діагностування різних технологічних середовищ тепло-механічного оливонаповненого обладнання АЕС.

Мета статті. Головною метою статті є удосконалення процесного підходу до діагностування газоподібних, рідких, твердих технологічних середовищ в процесі їх експлуатації в оливонаповненому обладнанні АЕС України на підставі результатів визначення у випробувальній лабораторії показників якості цих технологічних середовищ, що дозволить підвищити достовірність такого діагностування з урахуванням станів технологічних середовищ в оливонаповненому обладнанні.

Завдання дослідження. 1. Виконати аналітичний аналіз літературних джерел, що присвячені діагностуванню газоподібних, рідких, твердих технологічних середовищ в процесі їх експлуатації в оливонаповненому обладнанні енергопідприємств на підставі результатів визначення показників якості цих технологічних середовищ. 2. Удосконалити принципову схему розподілу технологічних середовищ в турбогенераторі типу ТВВ з водневим охолодженням ротора і статора та водяним охолодженням обмотки статора. 3. Надати рекомендації щодо удосконалення процесного підходу до діагностування технологічних середовищ у процесі їх експлуатації в оливонаповненому обладнанні АЕС при визначенні показників якості цих технологічних середовищ.

Предмет дослідження – газоподібні, рідкі, тверді технологічні середовища, що можуть змінювати свої показники якості під час їхнього можливого взаємного проникнення один в одного у вузлах оливонаповненого обладнання під час нормованої експлуатації цих вузлів або при виникненні в них дефектів, і при цьому такі зміни показників якості цих технологічних середовищ потребують їх відновлення за рахунок, наприклад, очищення, осушення, дегазації, регенерації. Як технологічне середовище можуть бути застосовані речовини: 1) газоподібні – водень, повітря, азот, двоокис вуглецю [11–13]; 2) рідкі: а) мінеральні (нафтові) TrO та синтетичні TrO , що отримані за технологією багатоступеневого каталітичного процесу перетворення газу в рідкі вуглеводні [6; 10]; б) мінеральні (нафтові) TuO та СВТО на основі трикслиненілфосфатів [8; 9]; в) вода для охолодження газоподібних, рідких, твердих технологічних середовищ у теплообмінниках [13; 14; 18; 19]; 3) тверді – вуглецеві волокнисті матеріали; активований вуглець, силікагелі, цеоліти, оксиди алюмінію, іонообмінні смоли [5; 6; 9; 15].

Виклад основного матеріалу. У роботі застосовано методи аналітичного аналізу літературних джерел, що присвячені діагностуванню газоподібних, рідких, твердих технологічних середовищ в процесі їх експлуатації в оливонаповненому енергетичному обладнанні України на підставі результатів визначення показників якості цих технологічних середовищ.

У роботах [20; 21] показано, що система діагностування обладнанні включає в себе сукупність елементів: об'єктів діагностування; засобів діагностування (апаратура та програми, за допомогою яких здійснюється діагностування об'єктів діагностування), правил діагностування об'єктів діагностування за вимогами технічної документації; виконавців діагностування об'єктів діагностування. Ці елементи системи діагностування обладнанні можна застосувати при їх адаптації до принципової схеми процесу діагностування технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС (рис. 1).



Рис. 1. Принципова схема процесу діагностування технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС: ТС – технологічні середовища оливонаповненого обладнання; ОНО – оливонаповнене обладнання; 1.1 – вибір діагностичного забезпечення; 1.2 – вибір засобів діагностування ТС; 1.3 – вибір алгоритму діагностування ТС; 2.1 – технічний стан ОНО; 2.2 – місце відбору проб ТС із ОНО; 2.3 – нормативні показники якості ТС; 3.1 – відповідність встановленим нормам для ТС; 3.2 – невідповідність встановленим нормам для ТС; 5.1 – результат визначення виду стану ТС в ОНО; 5.2 – результат визначення можливих причин зміну стану ТС в ОНО; 5.3 – результат прогнозування стану ТС в ОНО; 5.4 – висновок про результат діагностування ТС; 6.1 – аналітичний опис стану ТС; 6.2 – табличний опис стану ТС; 6.3 – графічний опис стану ТС; 6.4 – інші форми опису стану ТС

Джерело: адаптовано з робіт [20; 21].

У роботі [17] з урахуванням вимог процесного підходу наведено структуру взаємозв'язку між завданнями діагностування (рис. 2).



Рис. 2. Структура взаємозв'язку між завданнями діагностування [17]

Автори роботи [17] визначають, що: 1) взаємозв'язок діагностичних завдань на рис. 2 показано на прикладі одного, окремо взятого дефекту, а інтегральна ж оцінка стану об'єкту діагностування формується як сукупність оцінок усіх його вузлів, тому для складного об'єкту діагностування оцінювання його стану буде формуватися на основі набору подібних паралельних ланцюжків для кожного знайденого дефекту; 2) основними завданнями фахівців з діагностування є: зібрати та дати максимально можливу інформацію про наявні дефекти, причини та механізми їх розвитку, а також про наявний ресурс вузлів, деталей та об'єкта діагностування у цілому; базуючись на розпізнаних механізмах виникнення та розвитку дефектів, дати рекомендації відносно ресурсозберігаючих режимів експлуатації, періодичності проведення та об'єму заходів із контролю технічного стану об'єкта діагностування.

У роботах [22; 23] з урахуванням вимог процесного підходу наведено показники діагностування енергетичного обладнання під час: визначення виду технічного стану об'єкта діагностування; пошуку місця відмови чи несправності об'єкта діагностування; прогнозування технічного стану об'єкта діагностування (рис. 3).

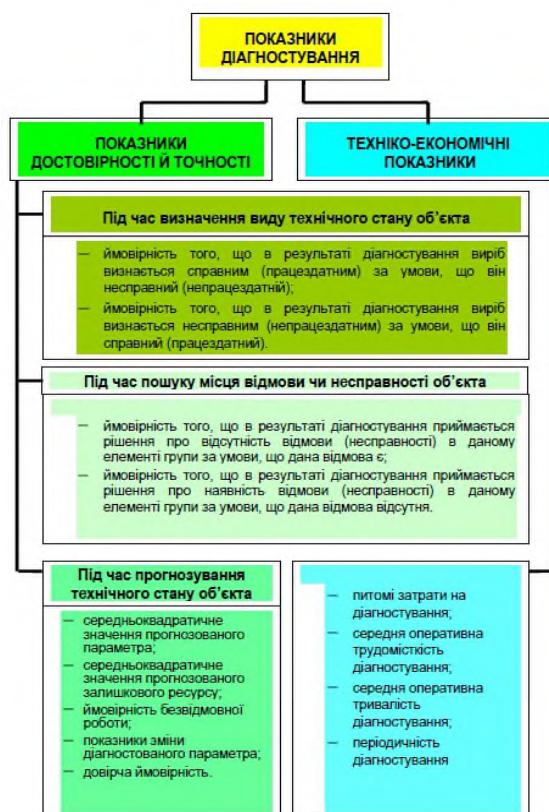


Рис. 3. Показники діагностування енергетичного обладнання [22]

Під час діагностування енергетичного обладнання: показники достовірності і точності діагностування оцінюють ступінь об'єктивної відповідності технічного діагнозу дійсному технічному стану енергетичного обладнання; показники техніко-економічної ефективності діагностування оцінюють ступінь пристосування системи діагностування до виконання поставлених завдань діагностування при економії енергетичних, матеріальних, трудових й екологічних ресурсів у порівнянні з існуючими методами та засобами діагностування енергетичного обладнання [22].

У роботі [24] наведено загальну структуру експертної системи оцінки стану турбогенератора (рис. 4).

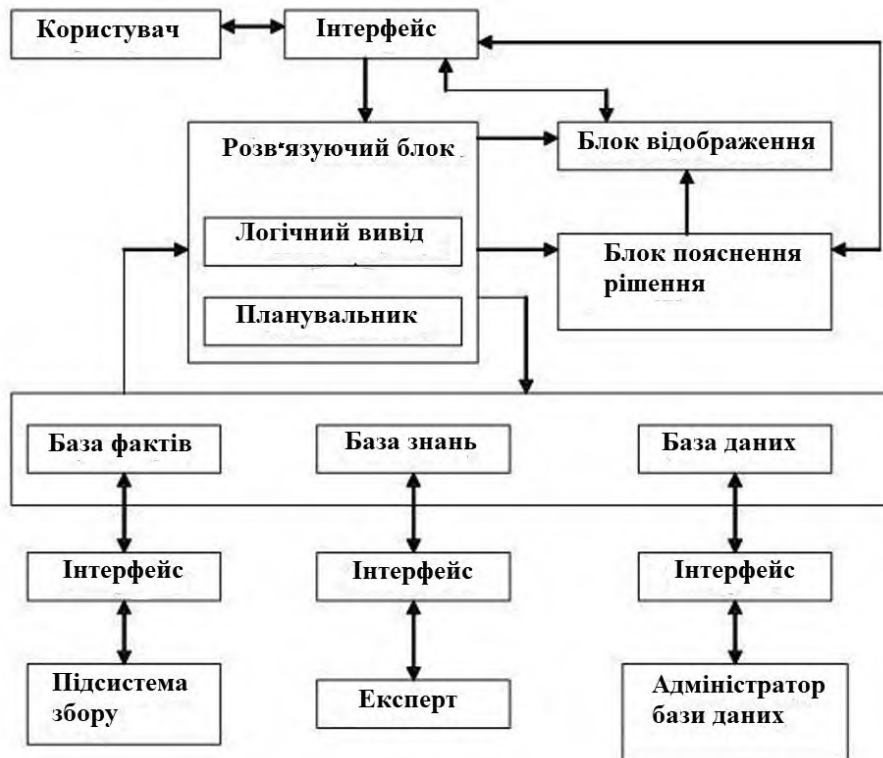


Рис. 4. Загальна структура експертної системи оцінки стану турбогенератора [24]

У роботі [24] показано, що експертна система діагностування стану турбогенератора дозволяє: одержати рішення на основі порівняння інформації їхньої бази фактів і правил з бази знань; відобразити отримані рішення; дати пояснення, чому прийняте таке рішення; може працювати як вузол локальної обчислювальної мережі, так і у складі автоматизованого робочого місця начальника зміни електростанції; може функціонувати в «автоматичному режимі» і в «режимі оперативного контролю». Така загальна структура експертної системи може бути застосована для розробки або удосконалення структури експертної системи діагностування станів технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС.

У роботі [25]: викладено керівництво з контролю стану та діагностування обладнання за контрольованими параметрами (наприклад, вібрацією, температурою, витратою робочого середовища, вмістом забруднювальних часток, потужністю, робочою швидкістю), які зазвичай пов'язують із якістю й умовами роботи обладнання; розглянуто відомі загальні методи та процедури, які використовують під час реалізації програми контролю стану (системи моніторингу стану обладнання) для обладнання всіх видів. На рис. 5 наведено рекомендовану в роботі [25] блок-схему програми діагностування обладнання з урахуванням можливого проведення планово-попереджувального (ПП) обслуговування.

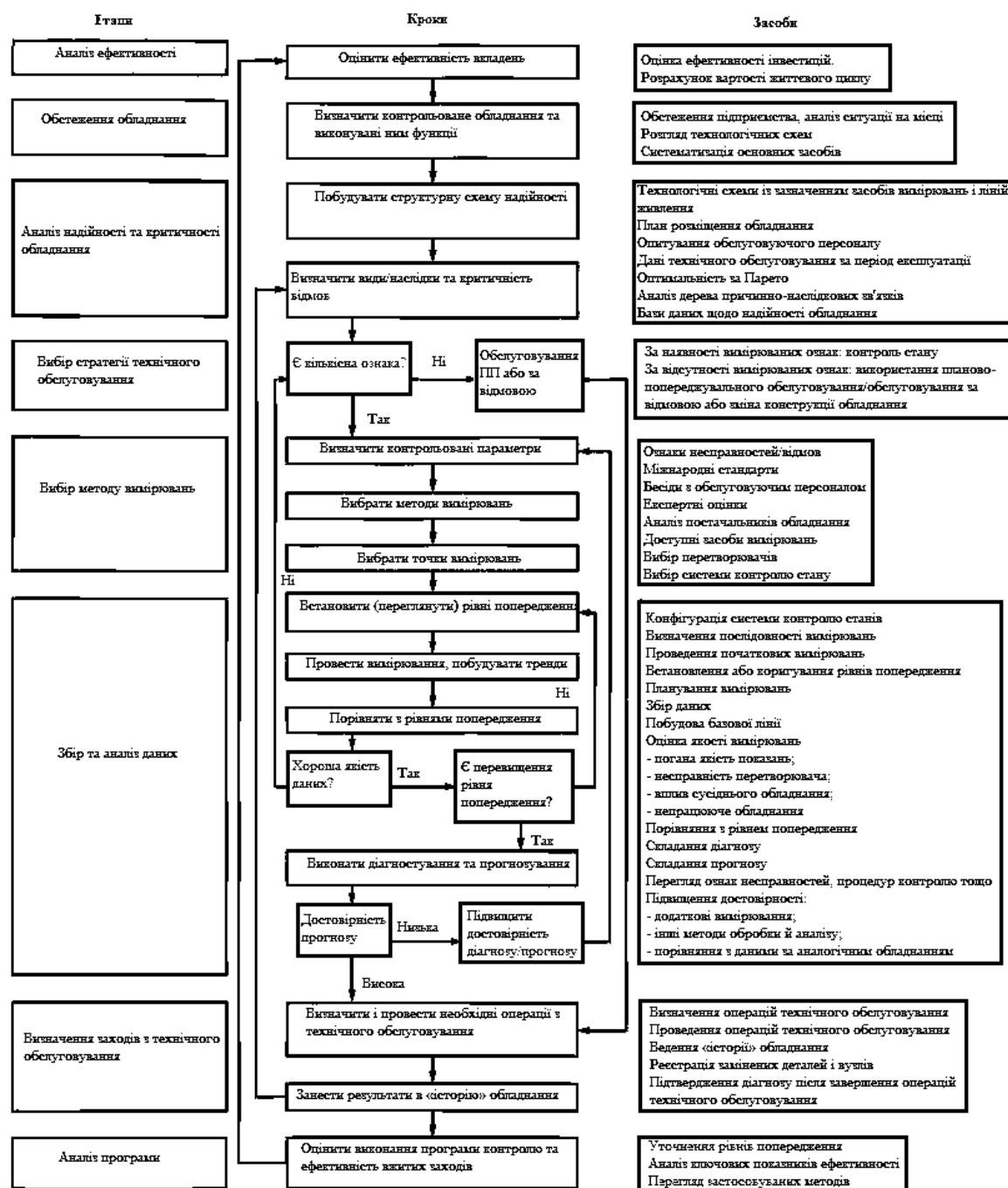


Рис. 5. Блок-схема програми діагностування обладнання [25]

Метою цієї програми має бути виявлення можливих дефектів в обладнанні та вжиття заходів щодо їх запобігання. При виконанні цієї програми: 1) з метою встановлення ключових показників ефективності програм моніторингу обладнання на початковій стадії виконують аналіз можливостей реалізації того чи іншого варіанта програми та ефективності матеріальних і фінансових вкладень у їх реалізацію. При цьому розглядають: вартість контрольованого обладнання з урахуванням терміну служби, витрат на технічне обслуговування та ремонт; вартість виробничих втрат унаслідок відмов обладнання; непрямий збиток через відмову обладнання; гарантії на обладнання та страхування виробничих ризиків; 2) виконують обстеження обладнання (визначають обладнання, що підлягає контролю; визначають функції, які виконує обладнання); 3) виконують аналіз надійності та критичності

устаткування (структурна схема надійності; критичність устаткування; аналіз видів, наслідків і критичності відмов; інші стратегії технічного обслуговування); 4) визначають методи контролю технічного стану (методи вимірювань; точність вимірювань; технічна реалізація вимірювань; режим роботи обладнання в процесі вимірювань; інтервал часу між вимірюваннями; швидкість збору даних; інформація, що реєструється; точки вимірювань; початковий рівень попередження; базовий рівень даних); 5) збір та аналіз даних (вимірювання параметрів і побудова трендів; якість вимірювань; порівняння результатів вимірювань із рівнем попередження; діагностування та прогнозування стану; підвищення достовірності діагностування та прогнозування); 6) визначення необхідних операцій технічного обслуговування; 7) аналіз застосовуваних методів; 8) навчання персоналу [25]. В роботах [1–25] виконано аналітичний аналіз літературних джерел, що зокрема присвячені діагностуванню технологічних середовищ в процесі їх експлуатації в енергетичному обладнанні на підставі результатів визначення показників якості цих технологічних середовищ. Результати цього аналізу можуть бути застосовані для діагностування газоподібних, рідких, твердих технологічних середовищ в оливонаповненому обладнанні АЕС.

Авторами цієї статті (з урахуванням вище отриманої інформації) прийнято наступне.

1. При застосуванні термінів та визначень: а) технологічні середовища в оливонаповненому обладнанні – це газоподібні, рідкі, тверді речовини або їх суміші, що знаходяться в оливонаповненому обладнанні для забезпечення його функціонування в таких видах його оперативних станів, як робота за призначенням, резервування, консервація, технічне обслуговування і ремонт, або видаляються з цього обладнання примусово або мимоволі в інше обладнання або в навколишнє середовище; б) стан технологічного середовища – це характеристика певної якості газоподібної, рідкої, твердої речовини за сукупністю властивостей, які зазнають змін у процесі його транспортування, зберігання, підготовки до застосування за призначенням, застосуванні за призначенням, відновленні, підготовки до утилізації, утилізації або застосуванні за іншим (або новим) призначенням цього технологічного середовища; в) діагностування технологічних середовищ оливонаповненого обладнання – визначення станів технологічних середовищ з означеною (заданою) точністю; визначення видів деградації технологічних середовищ та місця і причин їх прояву в оливонаповненому обладнанні; прогнозування станів технологічних середовищ на наступний інтервал часу.

2. При визначенні станів технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС: 2.1. Для TrO і TuO : стан до постачання свіжих олив у відповідні підрозділи АЕС; стан свіжих олив в процесі постачання (стан свіжих кондиційних олив; стан свіжих некондиційних олив); стан свіжих некондиційних олив в процесі їх відновлення; стан свіжих олив у процесі зберігання; стан свіжих олив у процесі підготовки до доливання (залливання) в обладнання; стан олив після доливання (залливання) в обладнання; стан олив в процесі експлуатації в обладнанні; стан експлуатаційних олив в процесі їх відновлення в працюючому обладнанні; стан експлуатаційних олив після заливання з обладнання для його технічного обслуговування або ремонту; стан експлуатаційних олив в процесі їх доливання (залливання) в обладнання після його технічного обслуговування або ремонту; стан відпрацьованих олив після заливання з обладнання; стан відпрацьованих олив в процесі їх регенерації; стан регенованих олив після доливання (залливання) в обладнання; стан олив в процесі промивання обладнання і трубопроводів; стан експлуатаційних радіоактивних TuO ; стан відпрацьованих радіоактивних TuO ; стан відпрацьованих радіоактивних TuO після очищення від радіоактивних домішок. 2.2. Для охолоджуючої води: стан на вході в теплообмінне обладнання; стан на виході з теплообмінного обладнання. 2.3. Для газоподібних технологічних середовищ: стан на вході в обладнання; стан на ви-

ході з обладнання. 2.4. Для адсорбентів та іонітів в системах: а) циркуляції ТрО в обладнанні: стан свіжих адсорбентів; стан відпрацьованих адсорбентів; стан регенованих адсорбентів; б) циркуляції мінеральних ТуО в обладнанні: стан свіжих адсорбентів для регенерації ТуО; стан відпрацьованих адсорбентів після регенерації ТуО; стан відпрацьованих радіоактивних адсорбентів після регенерації ТуО в) циркуляції СВТО в обладнанні: стан свіжих іонітів для відновлення СВТО; стан відпрацьованих іонітів після відновлення СВТО; стан регенованих іонітів після відновлення СВТО; стан відпрацьованих радіоактивних іонітів [26].

Як приклад для турбогенератора з водневим охолодженням ротора і статора та водяного охолодження обмотки статора і на підставі процесного підходу при систематизації можливих станів технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС з урахуванням його оперативних та технічних станів, на рис. 6 наведено удосконалену принципову схему розподілу технологічних середовищ в турбогенераторі типу ТВВ з водневим охолодженням ротора і статора та водяного охолодження обмотки статора [12–14].

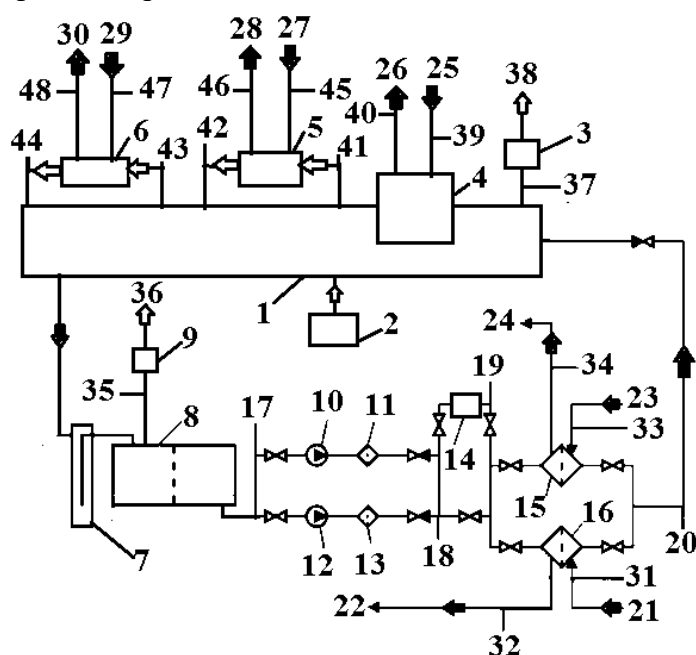


Рис. 6. Принципова схема розподілу технологічних середовищ в турбогенераторі з водневим охолодженням ротора і статора та водяного охолодження обмотки статора: 1 – турбогенератор; 2 – блок додавання водню в турбогенератор; 3 – блок видалення водню з турбогенератора; 4 – блок водяного охолодження обмотки статора турбогенератора; 5 – блок водяного охолодження потоку водню в турбогенераторі; 6 – блок видалення парів і крапель ТуО та води з потоку водню; 7 – рідинний затвор; 8 – бак для ТуО; 9 – блок видалення вентиляційних газоподібних викидів із бака 8 в атмосферу; 10, 12 – оливні насоси; 11, 13 – оливні фільтри; 14 – установка для дегазації потоку ТуО; 15, 16 – охолоджувачі ТуО типу «ТуО – вода»; 17–20 – точки відбору проб ТуО; 21, 23, 25, 27, 29 – входи потоків охолоджуючої води; 22, 24, 26, 28, 30 – виходи потоків охолоджуючої води; 31–34, 39, 40, 45–48 – точки відбору проб охолоджуючої води; 35 – точка відбору проби вентиляційних газоподібних викидів із бака 8; 36 – вихід очищених вентиляційних газоподібних викидів із бака 8 в атмосферу; 37 – точка відбору проби водню перед блоком 3; 38 – вихід потоку водню (з контролем його якості) в атмосферу; 41, 42 – вхід та вихід потоку водню в блок 5, відповідно; 43, 44 – вхід та вихід потоку водню в блок 6, відповідно

Джерело: адаптовано з робіт [12–14].

При визначенні станів технологічних середовищ в турбогенераторі 1 та обладнанні систем циркуляції потоків водню, охолоджуючої води та TuO , визначають таке (рис. 6): 1) для циркулюючих TuO : стан TuO після баку 8 (точка відбору проби 17); стан TuO до та після установки 14 (точки відбору проби 18, 19, відповідно)]; стан TuO після охолоджувачів 15, 16 типу « TuO – вода» (точка відбору проби 20); 2) для газоподібного водню в системі його циркуляції в турбогенераторі 1: стан водню в турбогенераторі 1 (точки відбору проби 37, 41, 42, 43, 44); стан вентиляційних газоподібних викидів із бака 8 в атмосферу (точки відбору проб 35, 36); стани вентиляційних газоподібних викидів інертного газу (азоту) із: поплавкового гідрозаслону, бачку продування, водневідокремлювального баку оливоочищувального пристрою, повітряного об'єму оливного бака, картерів підшипників, екранованих струмопроводів, кожухів лінійних і нульових виводів турбогенератора 1 (на рис. 6 умовно не показано); 3) для охолоджуючої води в системі циркуляції TuO : стан охолоджуючої води до та після охолоджувачів 15, 16 типу « TuO – вода» (точки відбору проб 31–34); 4) для охолоджуючої води в системі її циркуляції в охолоджувачах та в електричних обмотках статора в турбогенераторі 1: стан охолоджуючої води блоку 5 (точки відбору проб 45, 46); стан охолоджуючої води блоку 6 (точки відбору проб 47, 48); 5) для фільтрувальних елементів в системі циркуляції TuO : стан фільтрувальних елементів в фільтрах 11, 13 (точки відбору проб 17, 18); стан фільтрувальних елементів в установці 14 (точки відбору проб 18, 19); 6) для адсорбентів у системі циркуляції газоподібного водню в турбогенераторі 1: стан потоку газоподібного водню до та після блоку 3 (точки відбору проб 37, 38); стан потоків вентиляційних газоподібних викидів у суміші з воднем та повітрям до та після блоку 9 (точки відбору проб 35, 36).

Відмінність цієї удосконаленої технологічної схеми (рис. 6) від існуючої [12] полягає в тому, що в існуючу технологічну схему рекомендовано додатково додати таке: 1) дегазаційну установку 14 для дегазації та осушення потоку TuO . Це дозволяє осушити потік TuO та видалити із нього залишки розчиненого водню та повітря; 2) точки відбору проб технологічних середовищ: а) точки 17 і 18 відбору проб TuO – для визначення вмісту: механічних домішок; розчинених газів H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO , CO_2 , O_2 , N_2 . Це дозволяє визначити: ефективність роботи фільтрів 11, 13; підсмоктування повітря в насосах 10, 12 та акустичну кавітацію в них; б) точки 18 і 19 відбору проб TuO – для визначення вмісту: розчинених газів H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO , CO_2 , O_2 , N_2 та води. Це дозволяє визначити ефективність роботи установки 14 для дегазації потоку TuO ; в) точка 17 (або 20) відбору проб TuO – для визначення показників: кінематична в'язкість, температури спалаху у відкритому тиглі, кислотне число, вміст водорозчинних кислот, масова частка води, масова частка механічних домішок, клас промислової чистоти, рН водної витяжки, число деемульсації, вміст розчиненого шламу, антикорозійні властивості, схильність до піноутворення, час деаерації, стабільність до окиснення, об'ємний вміст повітря, вміст протиокисної присадки «Іонол», вміст таких розчинених та нерозчинених металів (та їх сполук), як Al, Ba, B, Ca, Cr, Cu, Cd, Fe, Pb, Mg, Mn, Mo, Ni, P, K, Na, Si, Ag, S, Sn, Ti, V, Zn. Це дозволяє визначити: якість TuO , що поступає із системи циркуляції TuO в турбогенераторі 1 (або в систему циркуляції TuO в турбогенераторі 1); наявність дефектів в зонах тертя у вузлах турбогенератора 1 та оливних насосів 10, 12; г) точки 41 і 42 відбору проб водню – для визначення вмісту води, що дозволяє визначати розгерметизацію блоку 5 та потрапляння води в потік водню; д) точки 43 і 44 відбору проб водню – для визначення вмісту парів і крапель TuO та продуктів піролізу обмотки статора в адсорбційному фільтрі блоку 6. Це дозволяє визначити ефективність роботи адсорбційного фільтра блоку 6; д) точки 37 і 38 відбору проб водню – для визначення вмісту парів і крапель TuO та продуктів піролізу обмотки статора, що дозволяє визначати ефективність роботи адсорбційного фільтра блоку 3; д) точки 45 і 46 відбору проб охолоджуючої води

– для визначення вмісту водню. Це дозволяє визначити розгерметизацію блоку 5 та потрапляння водню в потік охолоджуючої води; е) точки 47 і 48 відбору проб охолоджуючої води – для визначення вмісту водню. Це дозволяє визначити розгерметизацію блоку 6 та потрапляння водню в потік охолоджуючої води; є) точки 31–34 відбору проб охолоджуючої води – для визначення вмісту TuO . Це дозволяє визначити розгерметизацію охолоджувачів 15, 16 та потрапляння TuO в потоки охолоджуючої води; ж) точки відбору проб 35, 36 для визначення вмісту парів і крапель TuO . Це дозволяє визначити ефективність роботи адсорбційного фільтра блока 9. Періодичність відбору проб цих технологічних середовищ встановлює технічне керівництво АЕС в залежності від технічного стану оливонаповненого обладнання АЕС.

Такі технічні рішення дозволить діагностувати стан технологічних середовищ і технічний стан турбогенератора, його окремих вузлів та окремого обладнання систем циркуляції TuO , водню, охолоджуючої води.

3. При удосконаленні процесного підходу до діагностування газоподібних, рідких, твердих технологічних середовищ в процесі їх експлуатації в оливонаповненому обладнанні АЕС України на підставі результатів визначення у випробувальній лабораторії показників якості цих технологічних середовищ (що дозволить підвищити достовірність такого діагностування з урахуванням станів технологічних середовищ в оливонаповненому обладнанні), рекомендовано застосовувати міжнародні стандарти, які забезпечують функціонування елементів системи діагностування станів технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС, зокрема таких елементів цієї системи, як: структура взаємозв'язку між завданнями діагностування об'єкта діагностування; показники діагностування технологічних середовищ; принципова схема процесу діагностування технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС; загальна структура експертної системи оцінки стану технологічних середовищ; блок-схема програми діагностування технологічних середовищ.

Такі рішення дозволяють оптимізувати процеси діагностування технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС.

Висновки. 1. Удосконалено принципову схему розподілу технологічних середовищ в турбогенераторі типу ТВВ з водневим охолодженням ротора і статора та водняним охолодженням обмотки статора за рахунок того, що в існуючу технологічну схему рекомендовано додатково додати: а) дегазаційну установку для дегазації та осушення потоку TuO . Це дозволяє осушити потік TuO та видалити із нього залишки розчиненого водню та повітря; б) точки відбору проб технологічних середовищ турбогенератора. Такі технічні рішення дозволить діагностувати стан технологічних середовищ і технічний стан турбогенератора, його окремих вузлів та окремого обладнання систем циркуляції TuO , водню, охолоджуючої води. 2. При удосконаленні процесного підходу до діагностування газоподібних, рідких, твердих технологічних середовищ в процесі їх експлуатації в оливонаповненому обладнанні АЕС України на підставі результатів визначення у випробувальній лабораторії показників якості цих технологічних середовищ (що дозволить підвищити достовірність такого діагностування з урахуванням станів технологічних середовищ в оливонаповненому обладнанні), рекомендовано застосовувати міжнародні стандарти, які забезпечують функціонування елементів системи діагностування станів технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС, зокрема таких елементів цієї системи, як: структура взаємозв'язку між завданнями діагностування об'єкта діагностування; показники діагностування технологічних середовищ; принципова схема процесу діагностування технологічних середовищ оливонаповненого обладнання АЕС; загальна структура експертної системи оцінки стану технологічних середовищ; блок-схема програми діагностування технологічних середо-

вищ. Такі рішення дозволяють оптимізувати процеси діагностування технологічних середовищ оливнонаповненого обладнання АЕС. 3. Подальші перспективи досліджень полягають у виявленні оптимальних методів діагностування технологічних середовищ в процесі їх експлуатації в оливнонаповненому обладнанні АЕС для підвищення достовірності технічного діагностування цього обладнання.

Список використаних джерел

1. Гуназа, С. О. Аналіз досвіду експлуатації турбінних олив у ВП АЕС [Електронний ресурс] / С. О. Гуназа. – Режим доступу: <https://old.ntseu.net.ua/docs/gunaza.pdf>
2. Гуназа, С. О. Теоретичні та практичні основи експлуатації енергетичних олив в обладнанні ВП АЕС – НТСЕУ [Електронний ресурс] / С. О. Гуназа // Головна – НТСЕУ. – Режим доступу: https://old.ntseu.net.ua/stories/723-energy-oils_
3. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. – Вид. офіц. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 31 с.
4. ГКД 34.20.507-2003. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. – Вид. офіц. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ» М-во палива та енергетики України, 2003. – 598 с.
5. СОУ ВЕА. 100.1/01:2015 Енергетичні оливи та оливні господарства підприємств енергетичної галузі України, та підприємств, де застосовується аналогічне обладнання. Організація експлуатації та технічного обслуговування. Норми та вимоги. – Вид. офіц. – Київ: Стандарт «ВЕА», 2015. – 216 с.
6. СОУ-Н ЕЕ 43.101:2009. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Норми оцінювання якості. – Вид. офіц. – Київ: КВЦ: Міністерство палива та енергетики України, 2009. – 152 с.
7. Тихомиров А. Ю. Удосконалення режимів моніторингу технологічних середовищ з метою підвищення надійності експлуатації технологічного обладнання АЕС: дис. ... док. філософії: спец. 143, «Атомна енергетика» / А. Ю. Тихомиров. – Одеса, 2021. – 201 с.
8. СОУ НАЕК 006:2018. Турбінні оливи для енергетичного обладнання АЕС. Технічні вимоги до якості, умов приймання та зберігання. – Вид. офіц. – Київ: НАЕК «Енергоатом», 2018. – 57 с.
9. СОУ НАЕК 085:2020. Турбінні оливи для енергетичного обладнання АЕС. Правила експлуатації. – Вид. офіц. – Київ: НАЕК «Енергоатом», 2020. – 53 с.
10. IEC 60296:2020, IDT. Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear. – Geneva, Switzerland, International Standard. – 43p.
11. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання. – Вид. офіц. – Київ: ГРІФРЕ: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 266 с.
12. Посібник з вивчення Правил технічної експлуатації електричних станцій і мереж. Електротехнічне устаткування електричних станцій та мереж, оперативно-диспетчерське керування / О. Г. Баженов, В. О. Бойко, В. М. Браєрський, О. П. Васьковський. – Київ: ДП НТУКЦ «Аселенерго», 2004. – 800 с.
13. СОУ НАЕК 172:2018. Водно-хімічний режим систем и охолодження обмоток статора турбогенераторів типу ТВВ АЕС України. Технічні вимоги і способи забезпечення якості охолоджувального середовища. – Вид. офіц. – Київ: НАЕК «Енергоатом», 2018. – 24 с.
14. СОУ НАЕК 171:2018. Водно-хімічний режим другого контуру атомних електростанцій з реакторами типу ВВЕР. Технічні вимоги до якості робочого середовища другого контуру. – Вид. офіц. – Київ: НАЕК «Енергоатом», 2018. – 40 с.
15. СОУ НАЕК 007:2022. Матеріали іонообмінні фільтруючі систем очищення водних середовищ АЕС. Вимоги до якості, входного і експлуатаційного контролю. – Вид. офіц. – Київ: НАЕК «Енергоатом», 2020. – 31 с.
16. ДСТУ 4046-2001. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги. – Вид. офіц. – Київ: Державний стандарт України, 2021. – 27 с.
17. Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагоджування і в експлуатації. Частина 1 / Р. М. Гобрей, О. Є. Рубаненко, В.П. Таловер'я. – Київ: «ДП НТУКЦ», 2008. – 524 с.

18. Improvement of gas monitoring methods in water of the hydrogen-water cooling system of NPP'S turbine generator / S. Zaitsev, A. Tykhomyrov, V. Chychenin, V. Kyshnevskiy // Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News. – 2021. – № 1(29). – P. 49-57. DOI: <https://doi.org/10.20535/2218-930012021233705>

19. Zaitsev, S. Improvement of methods of gas chromatographic analysis of technological media of the main circulation pumps of a nuclear power plant / S. Zaitsev, V. Kyshnevsky, V. Chychenin, A. Tykhomyrov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 6/6(108). – Pp. 59–70. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217234

20. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. – Вид. офіц. – Київ: Держстандарт України, 1994. – 23 с.

21. ISO 13372:2012. Condition monitoring and diagnostics of machines – Vocabulary. Standard by International Organization for Standardization. Switzerland, Geneva. – 18 p.

22. Лут, М. Т. Діагностування енергетичного обладнання: навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів / М. Т. Лут, В. А. Наливайко, І. П. Радько. – Київ: Аграр Медіа Груп, 2014. – 590 с.

23. СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007. Технічне діагностування електрообладнання та контактних з'єднань електроустановок і повітряних ліній електропередачі засобами інфрачервоної техніки. – Вид. офіц. – Київ: ДП НЕК «Укренерго», 2007. – 125 с.

24. Шатковський, С. В. Експертна система діагностування блоків теплових електричних станцій [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://masters.donntu.ru/2010/etf/shatkovskiy/diss/indexu.htm>.

25. ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines. Standard by International Organization for Standardization. Switzerland, Geneva. – 26 p.

26. Ковальчук, В. І. Основи поводження з радіоактивними відходами на атомних електростанціях. Принципи, технології, обладнання / В. І. Ковальчук, І. Л. Козлов, О. А. Дорож. – Одеса : Астропринт, 2020. – 372 с.

References

1. Gunaza, S.O. (n.d.). *Analiz dosvidu ekspluatatsii turbinnykh olyv u VP AES [Analysis of the experience of turbine oils operation in NPPs]*. <https://old.ntseu.net.ua/docs/gunaza.pdf>.

2. Gunaza, S.O. (n.d.). *Teoretychni ta praktychni osnovy ekspluatatsiyi enerhetychnykh olyv v obladnanni VP AES [Theoretical and practical bases of the operation of energy oils in the equipment of the nuclear power plant]*. <https://old.ntseu.net.ua/stories/723-energy-oils>.

3. SE "UkrNDNC". (2019). *Zahal'ni vymohy do kompetentnosti vyprobuvalnykh ta kalibruval'nykh laboratoriy [General requirements for the competence of testing and calibration laboratories]*. (DSTU EN ISO/IEC 17025:2019).

4. "GRIFRE". (2003). *Tekhnichna ekspluatatsiia elektrychnykh stantsii i merezh. Pravyla [Technical operation of power plants and networks. Rules]*. (GCD 34.20.507-2003).

5. Standart "VEA". (2015). *Enerhetychni olyvy ta olyvni hospodarstva pidpryyemstv enerhetychnoyi haluzi Ukrayiny, ta pidpryyemstv, de zastosovuyet'sya analogichne obladnannya. Orhanizatsiya ekspluatatsiyi ta tekhnichnoho obsluhovuvannya. Normy ta vymohy [Energy oils and olive farms of enterprises of the energy sector of Ukraine, and enterprises where similar equipment is used. Organization of operation and maintenance. Norms and requirements]*. (SOU VEA. 100.1/01:2015).

6. KVITS. (2009). *Pryymannya, zastosuvannya ta ekspluatatsiya transformatornykh masel. Normy otsinyuvannya yakosti [Acceptance, application and operation of transformer oils. Norms of quality assessment]*. (SOU-N EE 43.101:2009).

7. Tykhomyrov A.Y. (2021). *Udoskonalennya rezhymiv monitorynhu tekhnologichnykh seredovyshch z metoyu pidvyshchennya nadiynosti ekspluatatsiyi tekhnologichnoho obladnannya AES [Improvement of technological medium monitoring moods aimed at enhancement of nuclear power plant equipment operation reliability]*. PhD dissertation.

8. NAEK "Energoatom". (2018). *Turbinni olyvy dlia enerhetychnoho obladnannya AES. Tekhnichni vymohy do yakosti, umov pryimannya ta zberihanni [Turbine oils for NPP power equipment. Technical requirements for quality, acceptance and storage conditions]* (SOU NAEK 006:2018).

9. NAEK "Energoatom". (2020). *Turbynni olyvy dlia enerhetychnoho obladnannya AES. Pravyla ekspluatatsii [Turbine oils for NPP power equipment. Operating rules]*. (SOU NAEK 085:2020).

10. "International Standard". (2020). *Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear* (IEC 60296:2020, IDT).
11. GRIFRE. (2007). Normy vyprovuvannya elektroobladnannya [Norms of electrical equipment testing] (SOU-N EE 20.302:2007).
12. Bazhenov, O.G., Boyko, V.O., Briersky, V.M., Vaskovskyi, O.P. (2004). *Posibnyk z vyvchennia Pravyi tekhnichnoi ekspluatatsii elektrychnykh stantsii i merezh. Elektrotekhnichne ustatkuvannia elektrychnykh stantsii ta merezh, operatyvno-dyspetcherske keruvannia* [Study guide for the Rules of Technical Operation of Power Plants and Networks. Electrical equipment of power plants and networks, operational and dispatch control]. SE NTUCC "Aselenergo".
13. NAEK "Energoatom". (2018). Vodno-khimichnyy rezhym systemy okholodzhennya obmotok statora turbogeneratoriv typu TVV AES Ukrainy. Tekhnichni vymohy i sposoby zabezpechennya yakosti okholodzhuvального seredovyschcha [Water-chemical regime of the winding cooling system stators of turbine generators of the TVV type of NPP of Ukraine. Technical requirements and methods of ensuring the quality of the cooling medium]. (SOU NAEK 172:2018).
14. NAEK "Energoatom". (2018). Vodno-khimichnyy rezhym drugoho konturu atomnykh elektrostantsiy z reaktoramy typu VVER. Tekhnichni vymohy do yakosti robochoho seredovyschcha drugoho konturu [Water-chemical mode of the second circuit of nuclear power plants with reactors of the VVER type. Technical requirements for the quality of the working environment of the second circuit]. (SOU NAEK 171:2018).
15. NAEK "Energoatom". (2022). Materialy ionoobminni fil'truyuchi system ochyshchennya vodnykh seredovyschch AES. Vymohy do yakosti, vkhidnoho i ekspluatatsynoho kontrolyu [Ion exchange filter materials for NPP water treatment systems. Requirements for quality, incoming and operational control]. (SOU NAEC 007:2022).
16. "State Standard of Ukraine". (2001). Obladnannya tekhnolohichne naftererobnykh, naftokhimichnykh ta khimichnykh vyrobnystv. Tekhnichne diahnostuvannya. Zahal'ni tekhnichni vymohy [Process equipment for oil refining, petrochemical and chemical production. Technical diagnostics. General technical requirements]. (DSTU 4046-2001).
17. Gobrey, R.M., Rubanenko, O.E., Taloveria, V.P. (2008). *Tekhnichne diahnostuvannya, vyprovuvannya ta vymiryuvannya elektroobladnannya v umovakh montazhu, nalahodzhuvannya i v ekspluatatsiyi. Chastyna 1* [Technical diagnostics, testing and measurement of electrical equipment during installation, commissioning and operation. Part 1]. SE NTUKTs.
18. Zaitsev, S., Tykhomyrov, A., Chychenin V., Kyshnevskyi V. (2021). Improvement of gas monitoring methods in water of the hydrogen-water cooling system of NPP'S turbine generator. *Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*, 1(29), 49–57. <https://doi.org/10.20535/2218-930012021233705>.
19. Zaitsev, S., Kyshnevsky, V., Chychenin, V., Tykhomyrov, A. (2020). Improvement of methods of gas chromatographic analysis of technological media of the main circulation pumps of a nuclear power plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 6/6(108), 59–70. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217234.
20. "State Standard of Ukraine". (1994). Tekhnichne diahnostuvannya ta kontrol' tekhnichnoho stanu. Terminy ta vyznachennya [Technical diagnosis and technical state inspection. Terms and definitions]. (DSTU 2389-94).
21. "Standard by International Organization for Standardization". (2012). *Condition monitoring and diagnostics of machines – Vocabulary*. (ISO 13372:2012). ¶
22. Lut, M.T., Nalyvaiko, V.A., Radko, I.P. (2014). Diahnostuvannya enerhetychnoho obladnannya: Navchal'nyy posibnyk dlya studentiv vyshchykh navchal'nykh zakladiv [Diagnostics of power equipment: Study guide for students of higher educational institutions]. Agrar Media Group.
23. SE NEC "Ukrengo". (2007). Tekhnichne diahnostuvannya elektroobladnannya ta kontaktnykh z'yednan' elektroustanovok i povitryanykh liniy elektroperedachi zasobamy infrachervonoyi tekhniky [Technical diagnostics of electrical equipment and contact connections of electrical installations and overhead power lines using infrared technology]. (COY-H EE 20.577:2007).
24. Shatkovskyi, S.V. *Ekspertna systema diahnostuvannya blokiv teplovykh elektrychnykh stantsiy* [Expert system for diagnostics of thermal power plant units]. (n.d.). <https://masters.donntu.ru/2010/etf/shatkovskiy/diss/indexu.htm>.

25. Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines. (2018). ISO 17359:2018. Standard by International Organization for Standardization. Switzerland, Geneva.

26. Kovalchuk, V.I., Kozlov I.L., Dorozh O.A. (2020). *Osnovy povodzhennya z radioaktyvnymy vidkhodamy na atomnykh elektrostantsiyakh. Pryntsyry, tekhnolohiyi, obladnannya [Fundamentals of radioactive waste management at nuclear power plants. Principles, technologies, equipment]*. Odesa: Astroprint.

Отримано 21.12.2024

UDC 662.753:621.89:621.311:621.039

Serhii Zaitsev¹, Victor Kishnevskiy²

¹PhD in Technical Sciences, engineer of the Department of Nuclear Power Plants
Odesa Polytechnic National University, (Odesa, Ukraine)

E-mail: sdjavdet@ukr.net, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

²Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Nuclear Power Plants
Odesa Polytechnic National University, (Odesa, Ukraine)

E-mail: kishnevskiy@op.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1780-2969>

PROCESS APPROACH TO DIAGNOSTICS OF PROCESS MEDIA OF OIL-FILLED EQUIPMENT OF A NUCLEAR POWER PLANT

This article is a review. This study considers: the main states of technological media during their operation in the oil-filled equipment of power enterprises, in particular in the units of a nuclear power plant; a process approach to diagnosing the technological media of oil-filled equipment of a nuclear power plant. The largest volume of power oils used in the oil-filled equipment of a nuclear power plant belongs to transformer and turbine oils. Gaseous, liquid, and solid substances (hydrogen, water, adsorbents, etc.) are used as process media in oil-filled equipment in Ukraine, the condition of which affects the technical condition of oil-filled equipment. Continuous improvement of the process approach to diagnosing the process media of oil-filled equipment of a nuclear power plant is relevant.

The analysis of researches and publications on the determination of the condition of technological media of oil-filled equipment of a nuclear power plant has shown that the process approach to the diagnosis of various technological media of thermomechanical oil-filled equipment of a nuclear power plant is currently not fully applied. This is due to the large number of physical and chemical indicators of the quality of these process media, operational and technical conditions of the oil-filled equipment or stages of its life cycle. All this requires expansion of the requirements for diagnosing process media to determine and predict their condition; continuous improvement of the process approach to diagnosing process media of oil-filled equipment in a nuclear power plant.

The aim of the article is to improve the process approach to diagnosing gaseous, liquid, solid process media during their operation in oil-filled equipment of Ukrainian nuclear power plants based on the results of determining the quality indicators of these process media in a testing laboratory, which will increase the reliability of such diagnostics, taking into account the states of process media in oil-filled equipment.

Based on the analysis of literature sources, modern methods of diagnosing technological media are considered. The paper solves the main tasks related to: diagnostics of technological gaseous, liquid, and solid media during their technical operation in power equipment based on the results of determining the quality indicators of these technological media; improvement of the schematic diagram of distribution of technological media in a TVV turbogenerator with hydrogen cooling of the rotor and stator and water cooling of the stator winding.

On the basis of the process approach, possible states of technological media of oil-filled equipment of a nuclear power plant are identified when determining the quality indicators of these technological media. At the same time, it is necessary to take into account the operational and technical conditions and life cycle stages of such equipment. When providing recommendations on the application of a process approach to diagnosing process media during their technical operation in oil-filled equipment of a nuclear power plant, it is determined that: the system for diagnosing process media includes a set of elements: objects of diagnosis (process media) and means, rules, and performers of diagnosis; it is necessary to apply international standards that ensure the functioning of the elements of the system for diagnosing the states of process media in oil-filled equipment.

The presented results can be used for a reasonable choice or development of new promising methods for diagnosing technological media during their operation in oil-filled equipment of a nuclear power plant to increase the reliability of technical diagnostics of this equipment.

Keywords: process media; transformer and turbine oils; hydrogen gas; oil-filled equipment; process approach; diagnostics; nuclear power plant.

Fig.: 6. References: 26.

**Олег Володимирович Ключев¹, Олександр Валентинович Садовой²,
Юлія Віталіївна Сохіна³**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та електромеханіки

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: kluev2006@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4542-3317>. Scopus Author ID: 57217113986

²доктор технічних наук, професор, професор кафедри електротехніки та електромеханіки

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: sadovoyav@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9739-3661>. Scopus Author ID: 57170694900

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та електромеханіки

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: jvsokhina@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4329-5182>. Scopus Author ID: 57205445522

**БЕЗДАТЧИКОВА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МАШИНОЮ
ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ФІЛЬТРА КАЛМАНА**

У статті розроблена бездатчикова система керування машиною подвійного живлення (МПЖ), у якій замість окремих ідентифікаторів змінних стану застосовується фільтр Калмана (ФК), який оцінює всі необхідні для векторного керування за колом ротора змінні електричної машини: проекції вектора потокозчеплення статора на ортогональні осі, кутову швидкість обертання ротора та його кут повороту відносно статора. Вхідними впливами спостерігача прийняті тільки керуючі напруги роторного кола, а проекції вектора нерегульованої напруги статора введени до складу матриці стану спостерігача Калмана як величини, що функціонально залежать від кута повороту ротора. Такий підхід дозволив синтезувати спостерігач Калмана, при якому відсутні автоколивання в процесі регулювання швидкості й система керування зберігає асимптотичну стійкість при різних рівнях стабілізації швидкості.

Ключові слова: машина подвійного живлення; векторне бездатчикове керування; релейний регулятор; ідентифікація координат; фільтр Калмана.

Рис.: 4. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Ідентифікувати опорний вектор потокозчеплення статора й механічні координати кута повороту ротора і його швидкість необхідно для реалізації векторного полеорієнтованого керування асинхронною машиною по колу ротора. Для ідентифікації цих координат створюють обчислювальні алгоритми, які використовують сигнали з датчиків струмів і напруг статора і ротора асинхронної машини (АМ). У статтях [1; 2] обґрунтовано, що у ролі спостерігача ефективно використовувати фільтр Калмана в асинхронних електроприводах із векторним керуванням для визначення їх змінних стану при випадкових перешкодах вимірів струмів і напруг. У цих статтях опорний вектор потокозчеплення ротора і його кутову швидкість визначав спостерігач Калмана. В алгоритмі спостерігача для його взаємодії з об'єктом використовувалося порівняння обчислених і обмірюваних значень проекцій вектора струму статора на осі α, β для стійкості процесу оцінювання. Рівняння спостерігача, що склали розширений фільтр Калмана і матриці Якобі, були п'ятого порядку. При векторному керуванні за колом ротора АМ крім опорного вектора і швидкості ротора ще необхідно визначати кут повороту ротора. Якщо застосувати очевидний підхід і кут повороту обчислювати інтегруванням отриманої від спостерігача оцінки швидкості, то векторна система керування машиною подвійного живлення стає непрацездатною, тому що немає асимптотичної стійкості. У цьому випадку виникають автоколивання опорного вектора потокозчеплення статора, які призводять до автоколивань електромагнітного моменту і кутової швидкості. Тому актуальною є задача синтезу спостерігача з додаванням у його склад рівняння кута повороту й залежних від нього змінних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У бездатчикових системах керування машинами подвійного живлення широко використовують фільтр Калмана. У статті [3] у коло ротора асинхронного генератора з подвійним живленням включений перетворювач частоти з активним випрямлячем з боку мережі. Спостерігач Калмана використовується для оцінки п'яти основних електричних параметрів схеми заміщення генератора. У [4]

запропонована система керування МПЖ, яка використовує еталонну прогнозуючу модель для передбачення струмів ротора вперед на один крок дискретизації за часом. Для оцінки кутової швидкості ротора і його кута повороту відносно статора використовується розширений фільтр Калмана, а для ідентифікації опорного вектора потокозчеплення статора застосовується окремий естиматор. У [5] проєкції опорного вектора потокозчеплення статора визначаються інтегруванням ЕРС статора, а спостерігач має знижений порядок і використовується для ідентифікації механічних координат МПЖ. У [6] розглядається високовольтний електропривод з п'ятирівневим інвертором і двома обмотками на статорі асинхронної машини. Нейронна мережа застосовується для формування послідовності керуючих імпульсів комутації силових транзисторів інвертора напруги. У колі зворотного зв'язку спостерігач Калмана вирішує стандартну задачу ідентифікації опорного вектора потокозчеплення і кутової швидкості ротора АМ. У [7] представлена модель безконтактної машини подвійного живлення і на її основі синтезований фільтр Калмана для обчислення проєкцій вектора потокозчеплення статора на осі d, q . У статті [8] пропонується робастне керування безщітковою машиною подвійного живлення на основі синергетичної теорії керування. Підвищення ККД вітрогенератора за схемою МПЖ досягається використанням регулятора з нечіткою логікою, а для оцінки швидкості ротора застосовується розширений фільтр Калмана.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Якщо фільтр Калмана використовувати тільки для ідентифікації проєкцій опорного вектора потокозчеплення статора і швидкості ротора, а кут повороту ротора (інформація про нього необхідна при формуванні впливів, що управляють, в роторі МПЖ) обчислювати як інтеграл від оцінки швидкості, то в системі керування виникають автоколивання опорного вектора потокозчеплення, а разом з ним електромагнітного моменту та швидкості ротора. Тоді потрібно збільшувати розмірність спостерігача Калмана на одиницю за рахунок введення у нього рівняння кута повороту ротора й у системі керування використовувати оцінку кута, що визначається спостерігачем. Тоді проєкції вектора напруги мережі, до якої підключається статор МПЖ, на осі, орієнтовані за вектором потокозчеплення статора, потрібно також вводити до складу спостерігача та його матриці Якобі. Робота замкнутої релейно-векторної системи керування МПЖ з описаним спостерігачем Калмана залишилася недослідженою.

Мета дослідження. Аналіз публікацій показав, що фільтр Калмана використовується для ідентифікації механічних координат, параметрів і опорного вектора потокозчеплення МПЖ у системах керування з різною структурою. При цьому входними впливами є чотири проєкції векторів напруг статора і ротора, а матриця адаптації містить чотири коригувальних коефіцієнти. У роботі ставиться задача дослідити динаміку МПЖ зі спостерігачем Калмана, який для взаємодії з об'єктом керування використовує тільки дві проєкції вектора струму ротора, а як входні впливи виступають лише проєкції вектора напруги ротора.

Виклад основного матеріалу. Запишемо рівняння електромагнітних процесів машини подвійного живлення в осях координат d, q . При постійній швидкості обертання ротора відому систему рівнянь електромагнітних процесів можна доповнити рівнянням руху і складену в такий спосіб модель покласти в основу синтезу фільтра Калмана. Система рівнянь у матричній формі має вигляд [9]:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{I}_{rd} \\ \hat{I}_{rq} \\ \hat{\Psi}_{sd} \\ \hat{\Psi}_{sq} \\ \hat{\omega}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_{11} & 0 & a_{13} & -a_{14}\hat{\omega}_e & 0 \\ 0 & -a_{22} & a_{23}\hat{\omega}_e & a_{24} & 0 \\ a_{31} & 0 & -a_{33} & \hat{\omega}_e & 0 \\ 0 & a_{42} & -\hat{\omega}_e & -a_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}_{rd} \\ \hat{I}_{rq} \\ \hat{\Psi}_{sd} \\ \hat{\Psi}_{sq} \\ \hat{\omega}_e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & -b_{13} & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & -b_{24} \\ 0 & 0 & b_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{rd} \\ U_{rq} \\ U_{sd} \\ U_{sq} \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \widehat{I}_{rd} \\ \widehat{I}_{rq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \widehat{I}_{rd} & \widehat{I}_{rq} & \widehat{\Psi}_{sd} & \widehat{\Psi}_{sq} & \widehat{\omega}_e \end{pmatrix}^T, \quad (2)$$

де коефіцієнти в системі рівнянь (1) дорівнюють:

$$\begin{aligned} a_{11} = a_{22} &= \frac{R' L_s}{\Delta}, \quad a_{23} = a_{14} = \frac{L_m}{\Delta}, \quad a_{13} = a_{24} = \frac{k_s R_s}{\Delta}, \quad a_{31} = a_{42} = k_s R_s; \\ a_{33} = a_{44} &= \frac{R_s}{L_s}, \quad b_{11} = b_{22} = \frac{L_s}{\Delta}, \quad b_{13} = b_{24} = \frac{L_m}{\Delta}; \quad b_{33} = b_{44} = 1; \\ \Delta &= L_s L_r - L_m^2, \quad R' = R_r + k_s^2 R_s. \end{aligned} \quad (3)$$

Система рівнянь (1), (2) вважається найбільш зручною для побудови фільтра Калмана стосовно до асинхронної машини при керуванні за ротором. Однак це твердження справедливе тільки для випадку, коли в системі керування присутній датчик положення ротора й потрібно ідентифікувати швидкість і вектор потокозчеплення. Якщо ж датчик положення ротора відсутній і, крім швидкості ротора і потокозчеплення статора, потрібно ще ідентифікувати і кут повороту ротора, то вихідну систему рівнянь необхідно формувати інакше. Проекції векторів напруг і струмів статора і ротора повинні бути представлені в осях координат, зв'язаних з цими частинами машини.

Напруга статора не регулюється і проекції її вектора на осі d, q , тобто величини U_{sd}, U_{sq} , залежать від кута повороту ротора γ . Справедливі координатні перетворення проекцій вектора напруги статора з осей α, β в осі ротора d, q :

$$U_{sd}(\gamma) = U_{s\alpha} \cos \gamma + U_{s\beta} \sin \gamma; \quad U_{sq}(\gamma) = U_{s\beta} \cos \gamma - U_{s\alpha} \sin \gamma. \quad (4)$$

У цьому випадку незалежними керуючими впливами будуть тільки напруги ротора U_{rd}, U_{rq} , а проекції напруг статора $U_{sd}(\gamma), U_{sq}(\gamma)$ входять до складу правих частин такої системи рівнянь, яка приймається за вихідну:

$$p \begin{bmatrix} \widehat{I}_{rd} \\ \widehat{I}_{rq} \\ \widehat{\Psi}_{sd} \\ \widehat{\Psi}_{sq} \\ \widehat{\omega}_e \\ \widehat{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{11} \widehat{I}_{rd} + a_{13} \widehat{\Psi}_{sd} - a_{14} \widehat{\omega}_e \widehat{\Psi}_{sq} - b_{13} U_{sd}(\widehat{\gamma}) \\ -a_{22} \widehat{I}_{rq} + a_{23} \widehat{\omega}_e \widehat{\Psi}_{sd} + a_{24} \widehat{\Psi}_{sq} - b_{24} U_{sq}(\widehat{\gamma}) \\ a_{31} \widehat{I}_{rd} - a_{33} \widehat{\Psi}_{sd} + \widehat{\omega}_e \widehat{\Psi}_{sq} + b_{33} U_{sd}(\widehat{\gamma}) \\ a_{42} \widehat{I}_{rq} - \widehat{\omega}_e \widehat{\Psi}_{sd} - a_{44} \widehat{\Psi}_{sq} + b_{44} U_{sq}(\widehat{\gamma}) \\ 0 \\ \widehat{\omega}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{rd} \\ U_{rq} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Як оцінка вектора стану системи використовується такий вектор

$$\widehat{X} = (\widehat{x}_{11} \widehat{x}_{21} \widehat{x}_{31} \widehat{x}_{41} \widehat{x}_{51} \widehat{x}_{61})^T = (\widehat{I}_{rd} \widehat{I}_{rq} \widehat{\Psi}_{sd} \widehat{\Psi}_{sq} \widehat{\omega}_e \widehat{\gamma})^T. \quad (6)$$

Цей вектор містить струм ротора, потік статора, швидкість обертання ротора і його кут повороту. Оцінка вимірюваних величин струмів ротора використовується при адаптації моделі спостерігача.

При побудові цифрових систем безперервні диференціальні рівняння замінюються різницевиими. Якщо період дискретизації за часом прийняти рівним T , то в момент часу, що відповідає k -му циклу програми для k -го і $(k-1)$ -го відліків можна записати

$$\frac{d}{dt} \widehat{X} \approx \frac{1}{T} (\widehat{X}_k - \widehat{X}_{k-1}). \quad (7)$$

З урахуванням виразу (7), система рівнянь (5) запишеться у вигляді такого різницевого рівняння

$$\begin{aligned} \frac{1}{T}(\hat{X}_k - \hat{X}_{k-1}) &= F(\hat{X}_{k-1}) + Bu_{k-1} \Rightarrow \hat{X}_k - \hat{X}_{k-1} = TF(\hat{X}_{k-1}) + TBu_{k-1} \Rightarrow \\ \hat{X}_k &= \hat{X}_{k-1} + TF(\hat{X}_{k-1}) + TBu_{k-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Тоді система рівнянь (5), (2) у різностях набуде вигляду

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k-1} + TF(\hat{X}_{k-1}) + TBu_{k-1} = D(\hat{X}_{k-1}), \quad (9)$$

$$\hat{y}_{k-1} = C\hat{X}_{k-1} = h(\hat{X}_{k-1}). \quad (10)$$

Тут вектор-функції D і h є функціями векторної змінної \hat{X} і мають такий вигляд

$$D(\hat{X}) = \begin{pmatrix} d_{11} \\ d_{21} \\ d_{31} \\ d_{41} \\ d_{51} \\ d_{61} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 - Ta_{11})\hat{I}_{rd} + Ta_{13}\hat{\Psi}_{sd} - Ta_{14}\hat{\omega}_e\hat{\Psi}_{sq} - Tb_{13}U_{sd}(\hat{\gamma}) + Tb_{11}U_{rd} \\ (1 - Ta_{22})\hat{I}_{rq} + Ta_{23}\hat{\omega}_e\hat{\Psi}_{sd} + Ta_{24}\hat{\Psi}_{sq} - Tb_{24}U_{sq}(\hat{\gamma}) + Tb_{22}U_{rq} \\ Ta_{31}\hat{I}_{rd} + (1 - Ta_{33})\hat{\Psi}_{sd} + T\hat{\omega}_e\hat{\Psi}_{sq} + Tb_{33}U_{sd}(\hat{\gamma}) \\ Ta_{42}\hat{I}_{rq} - T\hat{\omega}_e\hat{\Psi}_{sd} + (1 - Ta_{44})\hat{\Psi}_{sq} + Tb_{44}U_{sq}(\hat{\gamma}) \\ \hat{\omega}_e \\ T\hat{\omega}_e + \hat{\gamma} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$h(\hat{X}) = \begin{pmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{I}_{rd} \\ \hat{I}_{rq} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Для подальших обчислень знадобляться матриці Якобі вектор-функцій $D(\hat{X})$ і $h(\hat{X})$. Ці матриці складаються з часткових похідних і мають вигляд:

$$J(\hat{X}) = \frac{\partial D(\hat{X})}{\partial \hat{X}} = \begin{pmatrix} \partial d_{11}/\partial \hat{x}_{11} & \dots & \partial d_{11}/\partial \hat{x}_{61} \\ \dots & \dots & \dots \\ \partial d_{61}/\partial \hat{x}_{11} & \dots & \partial d_{61}/\partial \hat{x}_{61} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$H = \frac{\partial h(\hat{X})}{\partial \hat{X}} = \begin{pmatrix} \partial h_{11}/\partial \hat{x}_{11} & \dots & \partial h_{11}/\partial \hat{x}_{61} \\ \partial h_{21}/\partial \hat{x}_{11} & \dots & \partial h_{21}/\partial \hat{x}_{61} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Знайдемо матриці Якобі для виразів (11) і (12). Для цього врахуємо співвідношення

$$\frac{\partial U_{sd}}{\partial \gamma} = U_{sq}; \quad \frac{\partial U_{sq}}{\partial \gamma} = -U_{sd}, \quad (15)$$

які випливають з диференціювання формул (4). Тоді матриці Якобі будуть

$$J(\hat{X}) = \begin{pmatrix} 1 - Ta_{11} & 0 & Ta_{13} & -Ta_{14}\hat{\omega}_e & -Ta_{14}\hat{\Psi}_{sq} & -Tb_{13}U_{sq}(\hat{\gamma}) \\ 0 & 1 - Ta_{22} & Ta_{23}\hat{\omega}_e & Ta_{24} & Ta_{23}\hat{\Psi}_{sd} & Tb_{24}U_{sd}(\hat{\gamma}) \\ Ta_{31} & 0 & 1 - Ta_{33} & T\hat{\omega}_e & T\hat{\Psi}_{sq} & Tb_{33}U_{sq}(\hat{\gamma}) \\ 0 & Ta_{42} & -T\hat{\omega}_e & 1 - Ta_{44} & -T\hat{\Psi}_{sd} & Tb_{44}U_{sd}(\hat{\gamma}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T & 1 \end{pmatrix}, \quad (16)$$

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

В алгоритмі фільтра Калмана використовуються ще дві матриці: Q – коваріаційна матриця випадкових впливів на об'єкт; R – коваріаційна матриця випадкового шуму вимірів. Якщо всі координати вектора \hat{X} незалежні, то математичні сподівання їх змішаних добутоків нульові й матриця коваріації запишеться в такому вигляді

$$Q = \text{cov}(r) = \text{diag}(\sigma_{rid}^2 \quad \sigma_{riq}^2 \quad \sigma_{r\psi d}^2 \quad \sigma_{r\psi q}^2 \quad \sigma_{r\omega}^2 \quad \sigma_{r\gamma}^2), \quad (18)$$

де по головній діагоналі записані дисперсії змінних стану.

Матриця коваріації шуму вимірів запишеться так

$$R = \text{cov}(\rho) = M(\rho \rho^T) = \sigma_\rho^2 E, \quad (19)$$

де σ_ρ^2 – дисперсія струмів ротора ρ_{id}, ρ_{iq} ; E – одинична матриця.

Основним в алгоритмі спостерігача Калмана є знаходження матриці коефіцієнтів адаптації K . Алгоритм спостерігача Калмана на кожному інтервалі дискретизації за часом виконує такі властиві йому обчислення:

$$\tilde{X}_k = D(\hat{X}_{k-1}), \quad (20)$$

$$\tilde{P}_k = J P_{k-1} J^T + Q, \quad (21)$$

$$K_k = \tilde{P}_k H^T (H \tilde{P}_k H^T + R)^{-1}, \quad (22)$$

$$\hat{X}_k = \tilde{X}_k + K_k (y_k - H \tilde{X}_k), \quad (23)$$

$$P_k = (E - K_k H) \tilde{P}_k. \quad (24)$$

Величини \hat{X}_k і P_k , використовуються в наступному циклі розрахунку. Результатом описаного рекурсивного процесу є оцінка вектора стану МПЖ, що отримується на кожному циклі роботи програми

$$\hat{X}_k = (\hat{I}_{rd} \quad \hat{I}_{rq} \quad \hat{\Psi}_{sd} \quad \hat{\Psi}_{sq} \quad \hat{\omega}_e \quad \hat{\gamma}). \quad (25)$$

мережа живлення

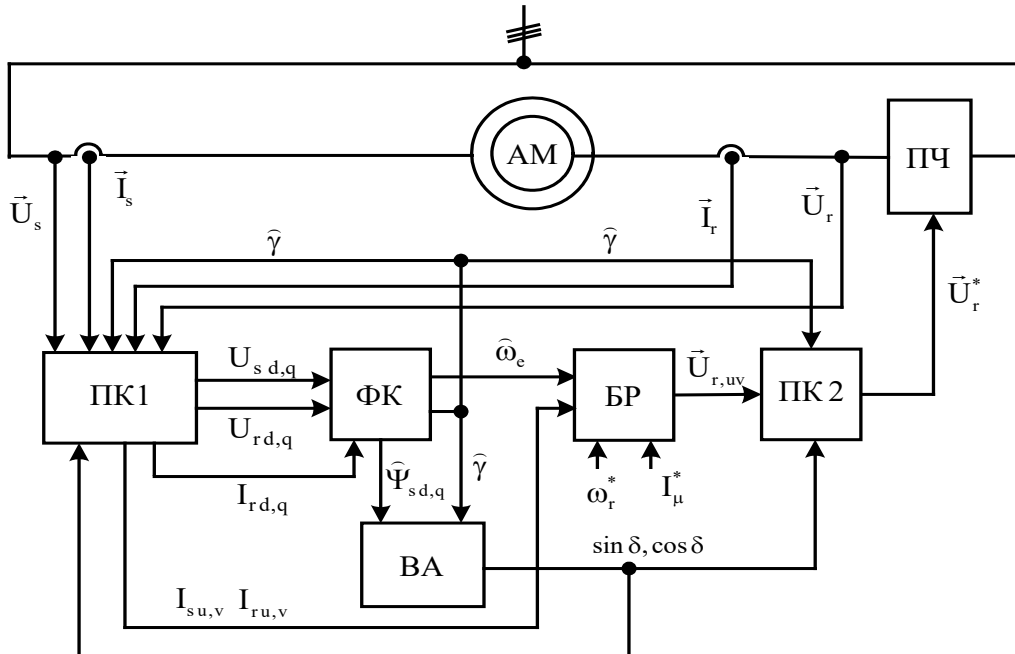


Рис. 1. Функціональна схема векторної системи керування МПЖ:

АМ – асинхронна машина; ПЧ – перетворювач частоти; ПК1, ПК2 – перетворювачі координат; ВА – векторний аналізатор; ФК – фільтр Калмана; БР – блок регуляторів

Проекції опорного вектора визначають на осі однієї з відомих ортогональних систем координат. У розроблювальній системі керування МПЖ фільтр Калмана обчислює кут

повороту ротора відносно статора, кутову швидкість ротора в ел. рад/с і проєкції вектора потокозчеплення статора на осі d, q . На рис. 1 зображена функціональна схема бездатчикової векторної системи керування МПЖ із фільтром Калмана в її складі. Транзисторний перетворювач частоти ПЧ включений у коло ротора АМ. Вимірюються тільки струми і напруги статорного і роторного ланцюгів АМ. У системі керування відсутні датчики кута повороту ротора, його швидкості та потокозчеплення – замість них використовується спостерігач Калмана, який обчислює ці величини.

Вхідні напруги для фільтра Калмана ФК обчислюються у блоці перетворювача координат ПК1. Ці обчислення містять вирази (4) і такі:

$$U_{s\alpha} = U_{sA}, U_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{sB} - U_{sC}); I_{s\alpha} = I_{sA}, I_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{sB} - I_{sC}); \quad (26)$$

$$U_{rd} = U_{ra}, U_{rq} = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{rb} - U_{rc}); I_{rd} = I_{ra}, I_{rq} = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{rb} - I_{rc}); \quad (27)$$

Оцінки проєкцій $\hat{\Psi}_{sd}, \hat{\Psi}_{sq}$ з виходу ФК надходять у векторний аналізатор ВА для визначення проєкцій вектора $\vec{\Psi}_s$ на осі α, β за формулами:

$$\hat{\Psi}_{s\alpha} = \hat{\Psi}_{sd} \cos \hat{\gamma} - \hat{\Psi}_{sq} \sin \hat{\gamma}, \hat{\Psi}_{s\beta} = \hat{\Psi}_{sd} \sin \hat{\gamma} + \hat{\Psi}_{sq} \cos \hat{\gamma}. \quad (28)$$

У блоці ВА для визначення напрямних синуса і косинуса використовуються проєкції $\hat{\Psi}_{s\alpha, \beta}$:

$$\hat{\Psi}_s = \sqrt{\hat{\Psi}_{s\alpha}^2 + \hat{\Psi}_{s\beta}^2}, \sin \delta = \hat{\Psi}_{s\beta} / \hat{\Psi}_s, \cos \delta = \hat{\Psi}_{s\alpha} / \hat{\Psi}_s. \quad (29)$$

У блоці ПК1 напрямні синус і косинус використовують для проведення розрахунків:

$$I_{su} = I_{s\alpha} \cos \delta + I_{s\beta} \sin \delta, I_{sv} = I_{s\beta} \cos \delta - I_{s\alpha} \sin \delta, \quad (30)$$

і переведення струмів ротора в осі u, v :

$$I_{r\alpha} = I_{rd} \cos \hat{\gamma} - I_{rq} \sin \hat{\gamma}, I_{r\beta} = I_{rd} \sin \hat{\gamma} + I_{rq} \cos \hat{\gamma}; \quad (31)$$

$$I_{ru} = I_{r\alpha} \cos \delta + I_{r\beta} \sin \delta, I_{rv} = I_{r\beta} \cos \delta - I_{r\alpha} \sin \delta. \quad (32)$$

Алгоритм обчислень блоку фільтра Калмана ФК реалізує алгоритм обчислень на кожному кроці дискретизації перехідних процесів відповідно до формул (20)-(24) з використанням матриць (11), (12), а також (16), (17). Проєкції вектора напруги ротора $U_{rd, q}$ є вхідними впливами для ФК, а проєкції вектора напруги статора $U_{sd, q}$ представляють внутрішні змінні спостерігача ФК. Для прив'язки ФК до об'єкта керування і додання йому асимптотичної стійкості як вимірюваний вектор y_k у формулі (23) використовуються проєкції вектора струму ротора $I_{rd, q}$, на процес виміру яких накладається випадковий гауссівський шум з коваріаційною матрицею R (19).

Алгоритми релейного керування змінними стану МПЖ реалізуються у блоці регуляторів БР. Номінальне значення струму намагнічування стабілізується у каналі реактивної потужності релейним регулятором із таким законом керування

$$U_{ru} = U_m \text{sign} [I_{\mu}^* - I_{su} - I_{ru}] = U_m \text{sign} [I_{\mu}^* - I_{\mu}], \quad (33)$$

де $I_{\mu} = I_{su} + I_{ru}$ – струм намагнічування; $I_{\mu}^* = I_{\mu m} = \Psi_{sn} / L_m$ – номінальне значення струму намагнічування; $\Psi_{sn} = U_m / \omega_0$ – номінальне значення модуля вектора потокозчеплення статора; U_m – амплітуда фазної напруги ротора; ω_0 – кругова частота мережі.

Регулятор активної складової струму ротора в каналі активної потужності підпорядкований зовнішньому регулятору кутової швидкості ротора. Закон керування релейного регулятора струму

$$U_{rv} = U_m \operatorname{sign}[U_{\omega}^* - I_{rv}]. \quad (34)$$

Релейний регулятор кутової швидкості ротора описується таким виразом

$$U_{\omega}^* = -I_{rv}^* \operatorname{sign}[\omega_r^* - \hat{\omega}_r + \gamma I_{rv}], \quad (35)$$

де $I_{rv}^* = 2I_{rvn} = \frac{4M_n}{3N\Psi_{sn}}$ – рівень обмеження активної складової струму ротора; $\hat{\omega}_r = \hat{\omega}_e/N$ –

сигнал оцінки швидкості ротора в геометричних рад/с, що обчислюється ФК; $\gamma = 3\Delta N\Psi_{sn}/(2J)$ – коефіцієнт зворотного зв'язку за активною складовою струму ротора.

В усіх регуляторах використовуються сигнали зворотних зв'язків за фактичними струмами ротора і сигнал зворотного зв'язку за оцінкою швидкості ротора, обчисленої спостерігачем Калмана. Керуючі впливи зі спрямованої за вектором потокозчеплення статора ортогональної обертової системи координат переводяться в перетворювачі координат ПК2 в зв'язані з ротором фазні осі координат за такими виразами:

$$U_{r\alpha} = U_{ru} \cos \delta - U_{rv} \sin \delta; \quad U_{r\beta} = U_{ru} \sin \delta + U_{rv} \cos \delta, \quad (36)$$

$$U_{rd} = U_{r\alpha} \cos \hat{\gamma} + U_{r\beta} \sin \hat{\gamma}; \quad U_{rq} = U_{r\beta} \cos \hat{\gamma} - U_{r\alpha} \sin \hat{\gamma}, \quad (37)$$

$$U_a^* = U_{rd}; \quad U_b^* = -\frac{U_{rd}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}U_{rq}; \quad U_c^* = -\frac{U_{rd}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{rq}. \quad (38)$$

Релейно-векторна система керування МПЖ орієнтована за вектором потокозчеплення статора і складається з двох каналів керування. У каналі активної потужності регулятор активної складової струму ротора (34) підпорядкований зовнішньому регулятору кутової швидкості ротора МПЖ (35). Швидкість стабілізується на рівні, обумовленому потребами технологічного процесу. У каналі реактивної потужності працює один регулятор струму намагнічування (33), що стабілізує струм намагнічування на постійному рівні I_{μ}^* незалежно від режимів регулювання швидкості. При струмі $I_{\mu} = I_{\mu}^*$, що розраховується по зазначеній вище формулі, струми в обмотках статора МПЖ збігаються за фазою з напругами статора – фазове зрушення між струмами і напругами обмоток статора відсутнє, статорний струм цілком активний і коефіцієнт потужності статора МПЖ дорівнює одиниці. При цьому збудження МПЖ відбувається реактивним струмом ротора.

У математичному середовищі Matlab написана програма розв'язання рівнянь МПЖ у фазних осях разом із системою керування, що включає в себе алгоритми керування релейних регуляторів і матриці координатних перетворень у прямому каналі й у колі зворотного зв'язку, у яке включений ФК. Використовувалася АМ з такими технічними даними: $P_n = 14 \text{ кВт}$, $U_{лн} = 380 \text{ В}$, $n_c = 1500 \text{ об/хв}$, $U_2 = 300 \text{ В}$. При моделюванні приймалося, що струми і напруги статора і ротора вимірюються без перешкод. При цьому ФК показав ефективну роботу, можливість якої при релейному керуванні обґрунтована в статті [10]. Однак матриця R приймалася відмінною від нуля і рівною $R = \operatorname{diag}[\sigma_{rd}^2, \sigma_{rq}^2] = \operatorname{diag}[1.8^2, 1.8^2]$. Елементи матриці Якобі J розраховуються і тим самим оновлюються на кожному інтервалі дискретизації за часом досліджуваних перехідних процесів. Матриця Q підбиралася в процесі моделювання і прийнята такою

$$Q = \operatorname{diag}(\sigma_{rd}^2, \sigma_{rq}^2, \sigma_{r\psi d}^2, \sigma_{r\psi q}^2, \sigma_{r\omega}^2, \sigma_{r\gamma}^2) = \operatorname{diag}(16 \cdot 10^{-4}, 16 \cdot 10^{-4}, 4 \cdot 10^{-8}, 4 \cdot 10^{-8}, 10^{-2}, 9 \cdot 10^{-8}). \quad (39)$$

На рис. 2 представлений алгоритм програми дослідження динаміки МПЖ з бездатчиковою релейно-векторною системою керування, побудованою на основі розширеного фільтра Калмана.

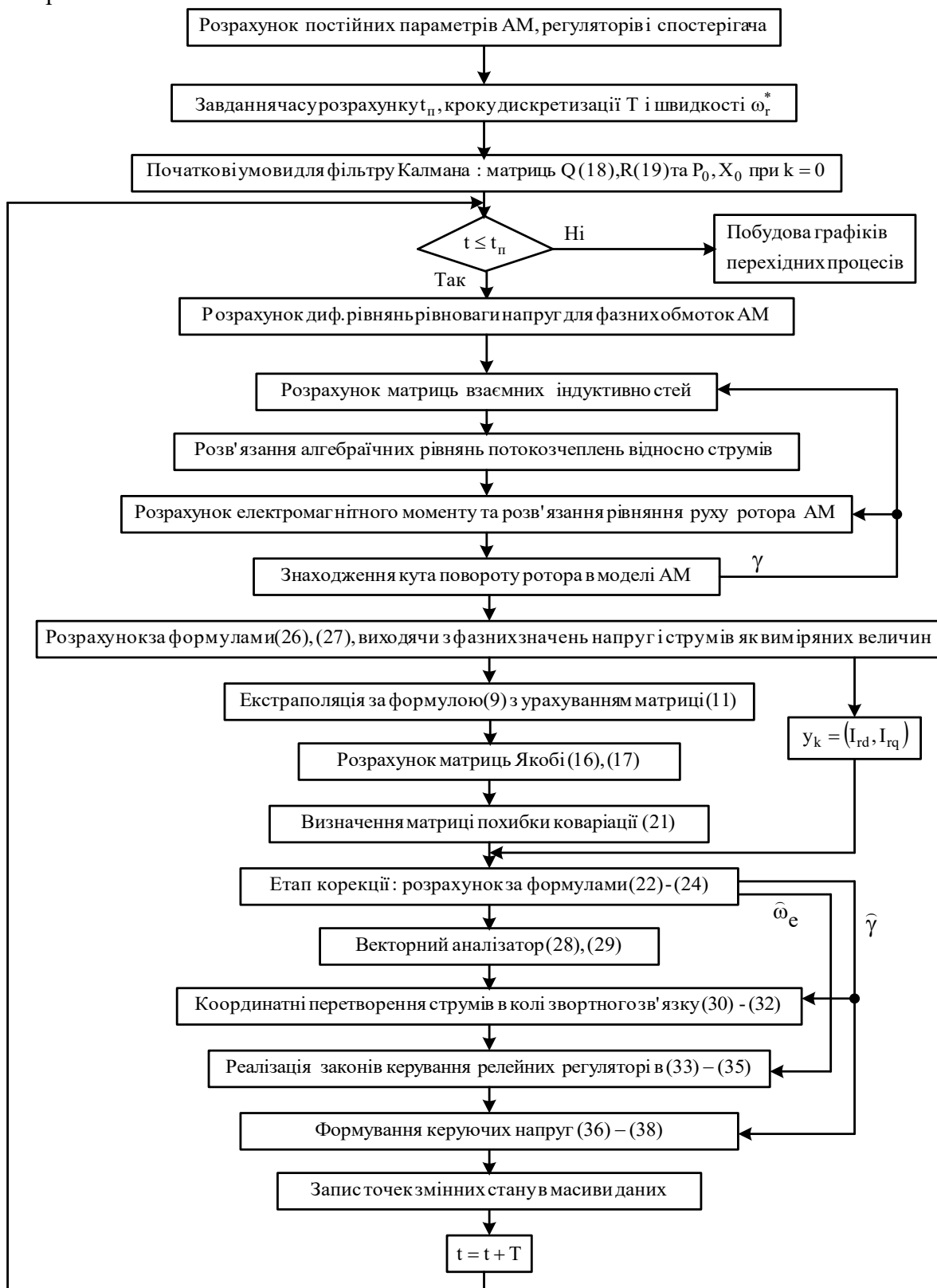


Рис. 2. Алгоритм програми дослідження динаміки МПЖ з бездатчиковою релейно-векторною системою керування

Рівняння АМ з фазним ротором записані у матричній формі у фазних осях координат. Розв'язання рівнянь моделі АМ також записувалися з використанням матриць та векторів параметрів та змінних. Усі обчислення виконуються в одному циклі, у якому на кожному кроці чисельного інтегрування диференціальних рівнянь застосований метод Ейлера, а для одночасного розв'язання підсистем алгебраїчних рівнянь знаходилася зворотна матриця. Етапи екстраполяції та корекції алгоритму спостерігача Калмана на кожному кроці дискретизації за часом T також розраховувалися матричними формулами, що представлені у статті.

На рис. 3 і 4 представлені графіки перехідних процесів у МПЖ із релейно-векторною системою керування і ФК у колі зворотного зв'язку для ідентифікації опорного вектора потокозчеплення статора, кутової швидкості ротора і кута його повороту. На вказаних рисунках синіми лініями показані змінні стану, а червоними – їх оцінені значення, визначені ФК. На рис. 3 спершу відбувається збудження МПЖ підключенням статора до мережі при нерухомому роторі. Після вгасання коливань вектора потокозчеплення статора починається розгін до номінальної швидкості без моменту навантаження. Потім прикладається навантаження з наступним уповільненням до зниженої швидкості. Щоб уникнути коливань вектора потокозчеплення статора при збудженні МПЖ можливо створювати магнітний потік струмами ротора при замкненому статорі, що показано на рис. 4. Далі подається сигнал завдання в канал регулювання швидкості і починається пуск при живленні ротора від перетворювача частоти при замкнених обмотках статора. Бездатчикова система керування з ФК працює таким чином, що при пуску з замкненим статором модуль потокозчеплення статора збільшується на час пуску й повертається до номінального рівня при досягненні швидкістю сталого значення. Коли ротор обертається з номінальною швидкістю здійснюється підключення статора до мережі. Це не позначається на якості керування швидкістю і практично не змінює сталі значення потокозчеплення. Функція перемикання релейного регулятора швидкості (35) з жорсткими зворотними зв'язками й не містить інтегральної складової. Тому система регулювання швидкості статична за збурюючим впливом, що підвищує запас стійкості системи та припустимо для електроприводів не потребуючих значного діапазону регулювання швидкості.

Кут повороту визначений спостерігачем Калмана прирівнюється нулю через кожні 2π радіан. Завдяки значній точності ідентифікації графіки кута повороту ротора і його оцінки практично збігаються. На рис. 3 і 4 показані значення кута і його оцінки на тих ділянках перехідного процесу, де їх незначні розбіжності помітні. Коли до вала двигуна не прикладений момент навантаження струм в обмотках статора відсутній. Він показаний синьою лінією на останніх діаграмах рис. 3 і 4. При додаванні навантаження струм в обмотках статора з'являється і збігається за фазою з напругами статора. У такому випадку струм статора цілком активний і досягає свого мінімального значення. Тому канал регулювання реактивної потужності зі стабілізацією струму намагнічування можна вважати контуром екстремального регулювання за критерієм мінімуму струму статора.

Висновки. У роботі досліджувалася динаміка машини подвійного живлення із системою керування, яка використовує фільтр Калмана, в алгоритмі ідентифікації якого застосовується нова структура і параметри матриці Якобі, що обумовлено розглядом проєкцій вектора напруги статора не як незалежних входних впливів, а як внутрішніх змінних стану, які залежать від кута повороту ротора. Це привело до нової форми запису моделі ФК і його матриць Якобі. Спостерігач містить часткові похідні проєкцій вектора напруги статора за кутом повороту ротора, які вносять випередження в процес ідентифікації координат фільтром Калмана, що дозволило уникнути автоколивань у системі керування, які виникали при використанні стандартного підходу, коли напруги статора розглядаються як зовнішні впливи. Математичне моделювання підтверджує відсутність автоколивань, а також асимптотичну стійкість алгоритму спостереження запропонованим ФК як електромагнітних, так і механічних координат МПЖ, що забезпечує відсутність статичної помилки ідентифікації швидкості, як змінної, що приймає усталене значення.

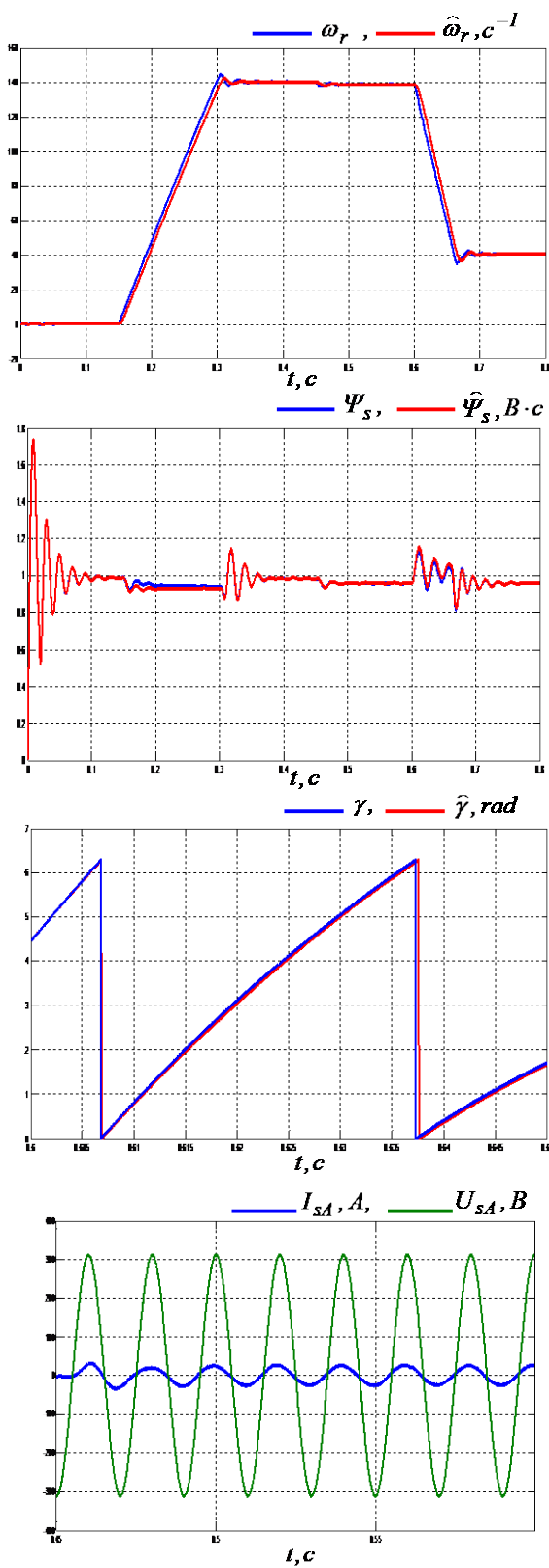


Рис. 3. Змінні стану МПДЖ та їх оцінки розраховані фільтром Калмана при пуску зі статором підключеним до мережі

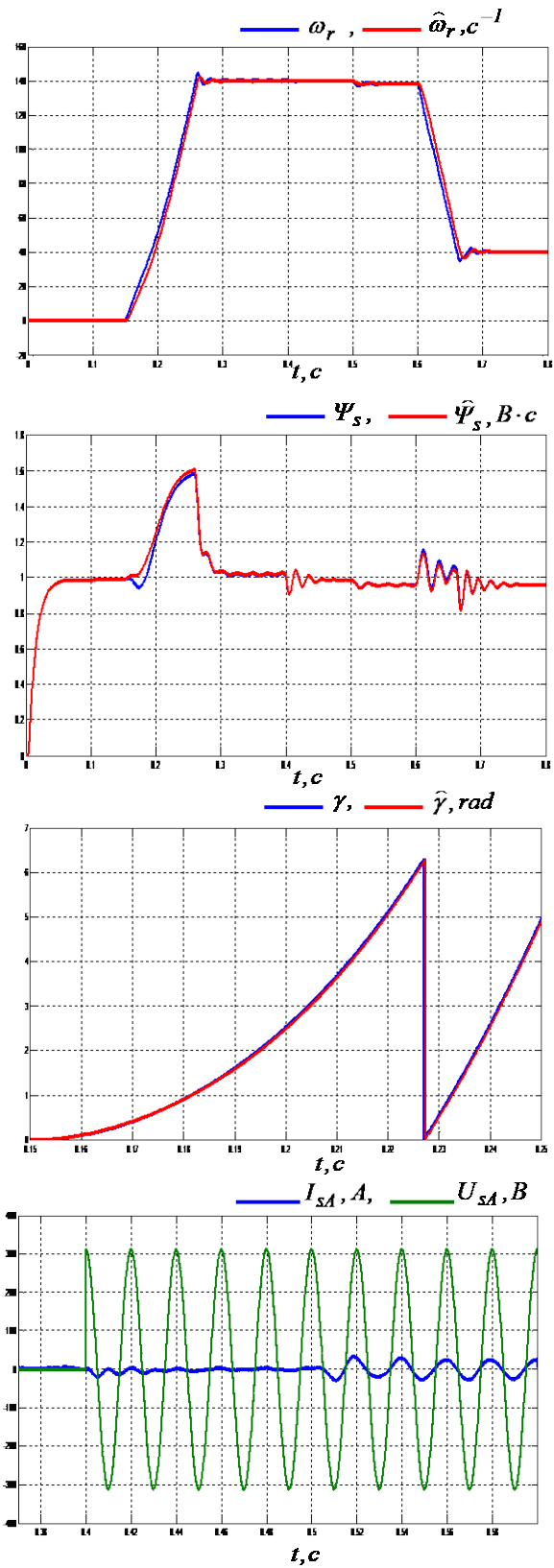


Рис. 4. Змінні стану МПДЖ та їх оцінки розраховані фільтром Калмана при пуску с замкненими обмотками статора

Список використаних джерел

1. Ключев, О. В. Використання фільтра Калмана як спостерігача стану у векторній системі керування асинхронною машиною / О. В. Ключев, О. В. Садовой, С. А. Сергієнко, Ю. В. Сохіна // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2022. – № 5(136). – С. 27-35. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.5.3>
2. Kalman Filter as Part of a Relay-Vector System Control of Asynchronous Electric Drive / O. Kliuiev, O. Sadovoi, Yu. Sokhina, S. Serhiienko // 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine. – 2023. – Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402448>.
3. Abdelrahem, M. Application of extended Kalman filter to parameter estimation of doubly-fed induction generators in variable-speed wind turbine systems / M. Abdelrahem, C. Hackl, R. Kennel // International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). – 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177628>.
4. Riccio, J. Odhano Zanchetta Sensorless and Modulated Model-Predictive Control for a Doubly Fed Induction Machine / J. Riccio, S. Odhano, P. Zanchetta // 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe). – 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.23919/EPE.2019.8915159>.
5. Ricardo Perez I. Experimental sensorless vector control performance of a DFIG based on an extended Kalman filter / I. Ricardo Perez, J. Cesar Silva, E. Juan Yuz, R. Gonzalo Carrasco // 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2012). – 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/iecon.2012.6388930>.
6. Lazreg, M. H. Sensorless Speed Control of Double Star Induction Machine With Five Level DTC Exploiting Neural Network and Extended Kalman Filter / M. H. Lazreg, A. Bentaallah // Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering. – 2019. – Vol.15, № 1. – Pp. 142-150.
7. Chaal Hamza. Improved direct torque control using Kalman filter: application to a doubly-fed machine / Chaal Hamza, Jovanovic Milutin // 11th IASTED International Conference on Control and Applications (CA 2009), 13-15 July 2009, Cambridge, UK. – 2009.
8. Beghdadi, M. A novel sensorless fully synergetic control of the brushless doubly-fed induction machine integrated in a wind-energy conversion system with a fuzzy-based HCS MPPT algorithm and an extended Kalman filter / M. Beghdadi, K. Kouzi // Elektrotehniski Vestnik: Ljubljana. – 2022. – Vol. 89, Issue 4. – Pp. 169-180.
9. Дослідження векторної системи керування машиною подвійного живлення з фільтром Калмана у контурі зворотного зв'язку / О. В. Ключев, О. В. Садовой, С. А. Сергієнко, Ю. В. Сохіна // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2024. – № 1 (144). – С. 234-243. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.31>.
10. Статистичний аналіз струму асинхронної машини з релейно-векторною системою керування / О. В. Ключев, О. В. Садовой, Ю. В. Сохіна, Ю. О. Жидко // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). – 2024. – № 1(44). – С. 99-108. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.44.2024.12>

References

1. Kliuiev, O.V., Sadovoi, O.V., Serhiienko, S.A., & Sokhina, Yu.V. (2022). Vykorystannia filtra Kalmana yak sposterihacha stanu u vektornii systemi keruvannia asynkhronnoiu mashynoiu [Using the Kalman filter as a state observer in a vector control system of an asynchronous machine]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug*, 5(136), 27-35. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.5.3>.
2. Kliuiev, O., Sadovoi, O., Sokhina, Yu., & Serhiienko S. (2023). Kalman Filter as Part of a Relay-Vector System Control of Asynchronous Electric Drive. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (pp.1–5). <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402448>.
3. Abdelrahem, M., Hackl, C., & Kennel, R. (2015). Application of extended Kalman filter to parameter estimation of doubly-fed induction generators in variable-speed wind turbine systems. *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCEP.2015.7177628>.
4. Riccio, J., Odhano, S., & Zanchetta, P. (2019). Sensorless and Modulated Model-Predictive Control for a Doubly Fed Induction Machine. *21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)*. <http://dx.doi.org/10.23919/EPE.2019.8915159>.
5. Ricardo Perez, I., Cesar Silva, J., Juan Yuz, E., & Gonzalo Carrasco, R. (2012). Experimental sensorless vector control performance of a DFIG based on an extended Kalman filter. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. <https://doi.org/10.1109/iecon.2012.6388930>.

6. Lazreg, M. H., & Bentaallah, A. (2019). Sensorless Speed Control of Double Star Induction Machine With Five Level DTC Exploiting Neural Network and Extended Kalman Filter. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 15(1), 142-150.

7. Chaal Hamza, & Jovanovic Milutin (13-15 July 2009). Improved direct torque control using Kalman filter: application to a doubly-fed machine. *11th IASTED International Conference on Control and Applications (CA 2009)*. Cambridge, UK.

8. Beghdadi, M., & Kouzi, K. (2022). A novel sensorless fully synergetic control of the brushless doubly-fed induction machine integrated in a wind-energy conversion system with a fuzzy-based HCS MPPT algorithm and an extended Kalman filter. *Elektrotehniski Vestnik: Ljubljana*, 89(4), 169-180.

9. Kliuiev, O.V., Sadovoi, O.V., Serhienko, S.A., & Sokhina, Yu.V. (2024). Doslidzhennia vektornoï systemy keruvannia mashynoiu podviinoho zhyvlennia z filtrom Kalmana u konturi zvorotnoho zv'iazku [Research of the vector control system of doubly fed machine with a Kalman filter in the feedback circuit]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho– Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug*, 1(144), 234-243. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.31>

10. Kliuiev, O.V., Sadovoi, O.V., Sokhina, Yu.V., & Zhydko, Yu.O. (2024). Statystychnyi analiz strumu asynkronnoi mashyny z releino-vektornoïu systemoiu keruvannia [Statistical analysis of asynchronous machine current with relay-vector control system]. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsky state technical university (technical sciences)*, 1(44), 99-108. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.44.2024.12>

Отримано 08.12.2024

UDC 62-83:681.513.5

Oleh Kliuiev¹, Oleksandr Sadovoi², Yuliya Sokhina³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate professor of the Department of Electrotechnical and electromechanical Dniprovsk State Technical University (Kamianske, Ukraine)

E-mail: kluev2006@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4542-3317>. Scopus Author ID: [57217113986](https://orcid.org/57217113986)

²Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Electrotechnical and electromechanical Dniprovsk State Technical University (Kamianske, Ukraine)

E-mail: sadovoyav@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9739-3661>. Scopus Author ID: [57170694900](https://orcid.org/57170694900)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate professor of the Department of Electrotechnical and electromechanical Dniprovsk State Technical University (Kamianske, Ukraine)

E-mail: jvsokhina@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4329-5182>. Scopus Author ID: [57205445522](https://orcid.org/57205445522)

SENSORLESS CONTROL SYSTEM BY DOUBLY FED MACHINE ON BASED THE KALMAN FILTER

Modern sensorless asynchronous electric drive systems for stator control widely use Kalman filters as observers of coordinates, parameters and disturbing influences. For doubly fed machines where control actions are formed in the rotor circuit when the stator is directly connected to the power supply network, the problem of vector control is complicated by the need to identify not only the reference vector of the flux linkage and the angular speed of the rotor of the asynchronous machine but also the angle rotation of the rotor relative to the stator. If we integrate the speed estimation signal from the observer's output, then the regulation process will be self-oscillating. Therefore, in the paper, the rotor rotation angle equation is included in the Kalman observer model. In this case only the control voltages of the rotor circuit are accepted as input influences of the observer, and the projections of the unregulated stator voltage vector are included in the state matrix of the Kalman observer as quantities that functionally depend on the angle of rotation of the rotor. This approach made it possible to synthesize a Kalman observer in which there are no self-oscillations in the process of speed control and the control system maintains asymptotic stability at various levels of speed stabilization. The Kalman filter implemented as a computer program on a micro-controller has insignificant inertia, does not introduce a phase shift into feedback signals, and with the correct choice of its parameters and structure has virtually no effect on the dynamics of the control system. The control system provides a good decomposition of the asynchronous machine into two control channels, and the Kalman filter, when implementing direct relay control in the active and reactive power channels, ensures high accuracy and stability of the process of identifying the coordinates of the electric drive, regardless of whether there are random noises in the measured currents and voltages.

Keywords: doubly fed machine; sensorless vector control; relay controller; coordinate identification; Kalman filter.

Fig.:4. References: 10.

Volodymyr Voytenko¹, Maksym Solodchuk²

¹PhD in Technical Sciences, Docent, associate professor of the Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics Department; researcher of the Department of Automatic Control Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine); Lund University, (Lund, Sweden)

E-mail: v.voytenko@stu.cn.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1490-0600>

ResearcherID: [F-8698-2014](https://orcid.org/0000-0003-1490-0600). Scopus Author ID: [36167678700](https://orcid.org/0000-0003-1490-0600)

²Head of the Department of Military Training

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: maxim_solodchuk@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1162-6784>

SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR EXPERIMENTAL STUDY OF TWO-COORDINATE POSITIONING SYSTEM OF AUXILIARY UAV VIDEO CAMERA

To solve the problem of fatigue of the UAV operator during long-term search and reconnaissance missions, a research hardware and software complex was created, in which the positioning of the auxiliary UAV video camera with a narrow field of view is carried out. Dynamixel Library for MATLAB and Simulink was used to organize the interaction of actuators with the virtual environment, which allows combining positioning and image analysis subsystems in a single virtual environment. The results of an experimental study of the 2DCAM virtual-physical system are given.

Keywords: *unmanned aerial vehicle (UAV); image analysis; computer vision; positioning; MATLAB; Simulink.*

Fig.: 4. Table: 4. References: 28.

Urgency of the research. The development of electronics, information and computer technologies has given a significant impetus to the improvement of long-known unmanned aerial vehicles (UAVs) [1]. This, in turn, made it possible to significantly expand the scope of application of UAVs compared to manned aircraft [2]. However, the traditional tasks of searching for objects, observing the earth's or water surface remain relevant [3]. The use of UAVs to solve such tasks can be more effective compared to the use of a manned device, especially in cases where the safety of the pilot is at risk. Therefore, further research for improving the UAV and its components is important.

Target setting. Remote control of the UAV is mostly carried out based on the image created by the on-board navigation video camera, transmitted using a radio channel and played back on the video monitor of the ground control point as part of the unmanned aircraft complex. During a long-term search mission, the UAV pilot has the additional task of analyzing this image, which requires increased attention. This can cause fatigue and lead to missing the object of interest [4], sometimes with serious consequences.

Actual scientific research and issues analysis. Much attention is paid to the problem of increasing the efficiency of human-operator interaction and technical means during the development of a human-machine interface [5]. In the case of UAVs, the ground control point can be equipped with additional video monitors and other operators can be included in the image analysis [6]. However, such (an extensive) solution to the problem is impossible when the mentioned ground control point must be highly mobile and inconspicuous, and all functions of interaction with the UAV must be performed by one single person. This can be helped by an additional video camera with a narrow field of view [7], the image of which shows a fragment of the frame of the main camera on an enlarged scale. Based on a sufficiently high degree of detailing of the object of interest, the pilot-operator can make a more informed decision about his further actions [8].

The problem is who (or what) should direct this additional camera to the area of interest within the frame of the main (navigation) camera. In [9], a constructive model of the interaction of two cameras is substantiated, as well as a structure that contains a software system for preprocessing and image analysis is proposed. The ultimate purpose of this system is to

determine the area of interest and form commands for positioning an additional video camera. There, the key components of one of the electric drives for positioning an additional camera with mechanical links were determined and their simulation was performed.

In order to carry out an experimental research, software and hardware solutions are proposed in [10], which could potentially be used to solve the entire set of tasks, including image processing and control of the electric motors of the positioning of an additional video camera based on the results of the analysis of the image from the navigation video camera, directly on board the UAV and under the conditions of restrictions typical for this case.

In [11], a structural model of the electric drives of the two-coordinate positioning system of the additional video camera of the UAV is presented. On the basis of the formulated specific requirements, typical for work on board the UAV, the choice of brushless direct current (*BLDC*) motors is justified, and a well-known mathematical model has been refined. In particular, the structure of the motor as a link of the automatic control system, transmission functions, as well as the *BLDC* model in continuous time are proposed. It is the basis for the development of an optimal digital regulator. Taking into account that the operation of an ideal optimal digital controller on a UAV is not possible, and the existing hardware and software tools allow deploying a pre-trained neural network on board, the idea of using a quasi-optimal motion controller is proposed. Its training should be organized on the basis of available software tools, originally designed to work as part of an image recognition system.

As a task of the next stage of research, it was also determined that it is necessary to find the transfer function of the traditional optimal controller and compare the performance of two controllers: optimal and quasi-optimal.

Uninvestigated parts of general matters defining. The conducted theoretical studies, as well as simulation modeling, determine the key parameters and indicate promising directions for the practical implementation of the system of two-coordinate positioning of the additional video camera of the UAV. However, these results must have a sufficiently high degree of verification even before schematic diagrams are developed, electronic components are purchased, printed circuit boards are assembled and manufactured. Otherwise, large material and time costs may not be justified. For example, such a problem as choosing an adequate microcontroller, its performance and peripheral devices, and even expensive tools for it, can significantly worsen the development prospects, if this problem is not solved in the best way. Here we also depend significantly on other components, such as the object detector [10] and others. Therefore, it is very important to do one more intermediate step before making the final system, which is usually called the *physical modeling stage*.

It is most convenient to conduct full-scale experiments in the same software environment in which the simulation was carried out. The *MATLAB/Simulink* environment [12] provides wide opportunities not only for simulation modeling of multi-domain systems, but also for connecting to various executive and measuring devices. Tools such as *Image Processing and Computer Vision* [13] will allow in further studies to extend physical modeling also to subsystems related to image processing. Finally, this environment also supports UAV navigation, artificial intelligence and machine learning tools, which makes it possible to solve a much wider range of tasks related to the problems formulated above.

[14] provides a description of a high-level software library that allows you to control *DYNAMIXEL* actuators directly from the *MATLAB/Simulink* environment [15]. This library contains *MATLAB* functions and *Simulink* blocks of general use, which should be supplemented with such capabilities that will allow solving tasks that rely on the subsystem for positioning the additional camera of the UAV.

The research objective. The purpose of the article is to create a research software-hardware complex that, from the *MATLAB/Simulink* environment, allows you to control the positioning of the additional video camera of the UAV by pitch and yaw angles. This allows combining two subsystems – positioning and image analysis – in a single virtual environment to solve the problem of increasing the efficiency of the UAV pilot-operator during long-term search and reconnaissance missions.

In order to achieve the goal, it is necessary to solve such tasks as the analysis of actuators and their control software; refinement and development of blocks that allow you to form the necessary positioning tasks and visualize the current parameters of the two-coordinate positioning system of the auxiliary UAV camera; experimental testing of the complex's performance.

Presentation of the main material

Hardware and software of the complex. Despite the prospects of BLDC [11], this work uses *DYNAMIXEL* actuator systems based on DC motors [16], as it allows you to quickly assess the possibility of solving the problems formulated above. We justify this choice as follows:

1) In these drives, at the mechanical, electronic and algorithmic level, the motor, reduction gear, controller, driver, sensors, as well as network functions are integrated, which allow to significantly reduce the time required for the development of means of communication with a personal computer.

2) A wide range of actuators allows you to choose a device according to the required parameters (supply voltage, torque on the shaft, resolution, etc.). At the time of writing, there are at least 72 actuators available [17] that use both DC and BLDC motors.

3) The software supported by the built-in controller includes *DYNAMIXEL (Wizard; SDK; Workbench)*, *Arduino IDE*, *RoboPlus (R+)*, etc., which allows (including) to implement the daisy-chaining connection of several actuators [18].

4) Availability of libraries [19], which can immediately be used as a basis for further research within the *MATLAB/Simulink* environment.

5) From the point of view of control, both BLDC and DC motor are very close, which makes it possible to further use the currently created prototypes of motion controllers in other actuators.

The simplest actuators of the first generation were taken as a basis:

– *DYNAMIXEL AX-12A* [20] for positioning the video camera at the yaw angle (along the horizontal line);

– *DYNAMIXEL AX-18A* [21] for positioning the video camera by the pitch angle (along the vertical line).

The advantage of these models of actuators at the beginning of development was small dimensions and weight, low power supply voltage and cost.

The appearance of the hardware part of the experimental complex is shown in *Fig. 1*.

The research used a personal computer with an *Intel^R CoreTM i7-4770 CPU @ 3.40GHz*, 16.0 GB of RAM, on which the *Windows 10 Pro* operating system, *MATLAB[®] R2024a* was installed, and the *Linux Ubuntu 20.04.4 LTS (Focal Fossa)* operating system was deployed using *VirtualBox*.

To work with video cameras and object detectors, a platform for developing embedded systems using machine learning *phyBOARD[®]-Pollux AI kit* [22] was used. Two video cameras are connected to the single board computer *phyBOARD-Pollux* [23]: *VM-016-COL-M-M12* [24] and *VM-017-COL-M-H* [25]. The latter was chosen in the version with a C/CS mount bracket to ensure the possibility of connecting special lenses.

DYNAMIXEL actuators are connected to a personal computer via a *USB* interface using a small *U2D2* converter [26].



Fig. 1. Software and hardware complex

Source: developed by the authors.

Main functions of *Dynamixel Library for MATLAB and Simulink* and their capabilities

Requirements for the computer platform and a detailed description of the *Dynamixel Library for MATLAB and Simulink* installation are described in [14]. This library, in turn, is based on the dynamic library in the C language, which is included in the *DYNAMIXEL SDK software development kit* [19].

The library [14] has a total of 38 *MATLAB* functions. Of them, 15 functions are intended mainly for reading information (*Table 1*), 12 – for writing (*Table 2*).

Table 1 – *MATLAB* functions of the library [14] for reading information

Function	Comments
bulkReadAddParamDxl	Adds parameters for bulk read function of Dynamixel motors
bulkReadDxl	Returns the acquired data from bulk read function for the connected Dynamixel motors
bulkReadTxRxPacket	Executes bulk read for Dynamixel motors
fastSyncReadDxl	Executes fast sync read for Dynamixel motors and returns the selected read parameter
fastSyncReadDxlSim	Executes fast sync read for Dynamixel Motors in Simulink
initBulkReadDxl	Initializes the bulk read function for Dynamixel motors and returns the group numbers
initSyncReadDxl	Initializes the sync read function for Dynamixel motors and returns the group numbers
initSyncReadIndirectDxl	Initializes the sync read function using indirect addresses of Dynamixel motors and returns the group numbers
readDxl	Executes read for Dynamixel motors and returns the acquired data
readDxlSim	Executes read for Dynamixel motors and returns the acquired data
setIndirectReadDxl	Sets indirect addresses for enabling fast sync read for multiple Dynamixel motors
syncReadAddParamDxl	Add parameter for bulk read function of Dynamixel motors
syncReadClearParamDxl	Clears parameters for bulk read function of Dynamixel motors
syncReadDxl	Executes sync read for Dynamixel motors and returns the acquired data
syncReadDxlSim	Executes sync read for Dynamixel Motors in Simulink

Source: developed by the authors.

"Fast" functions allow exchanging information with remote actuators in one operation at the same time, using indirect addressing.

Table 2 – MATLAB functions of the library [14] for recording information

Function	Comments
bulkWriteAddParamDxl	Adds parameters for bulk write function of Dynamixel motors
bulkWriteDxl	Executes bulk write for Dynamixel motors
fastSyncWriteDxl	Executes fast sync write for Dynamixel motors
fastSyncWriteDxlSim	Executes fast sync write for Dynamixel Motors in Simulink
initBulkWriteDxl	Initializes the bulk write function for Dynamixel motors and returns the group write number
initSyncWriteDxl	Initializes the sync write function using indirect addresses of Dynamixel motors and returns the group numbers
initSyncWriteIndirectDxl	Initializes the sync write function using indirect addresses of Dynamixel motors and returns the group numbers
setIndirectWriteDxl	Sets indirect addresses for enabling fast sync write for multiple Dynamixel motors
syncWriteDxl	Executes sync write for Dynamixel motors and returns the acquired data
syncWriteDxlSim	Executes sync write for Dynamixel motors in Simulink
writeDxl	Executes write for Dynamixel motors
writeDxlSim	Executes write for Dynamixel motors in Simulink

Source: developed by the authors.

Other available *MATLAB* functions can be classified according to the following features:

- initialization functions of both the library itself and the initialization of reading or writing from/to the actuators (7 pcs.);
- functions of synchronous initialization, reading or writing from/to actuators (14 pcs.);
- batch manipulations with actuators (7 pcs.);
- functions of fast synchronous reading or writing from/to actuators (4 pcs.).

It should be noted that this conditional classification helps to quickly navigate the available tools and start using them. Since some of the functions combine several operations mentioned above, that is, they belong to two or more classes at the same time, the total number of functions mentioned here does not coincide with their full number.

Ten unclassified *MATLAB* functions (*Table 3*) allow you to control the communication port, search for and configure found actuators, and check their status and communication errors. Of course, they perform some *I/O* or read or write operations, as do any peripheral access functions.

Table 3 – Unclassified MATLAB library [14] functions

Function	Comments
openPortDxl	Opens port for communication with Dynamixel motors
setBaudDxl	Sets the baudrate of Dynamixel motor communication
closePortDxl	Closes communication port with connected Dynamixel motors
findserial	Finds and returns connected serial (COM) ports
findDxl	Finds connected Dynamixels, returns their IDs and models
torqueDxl	Enables or disables the torque to Dynamixel motors
driveModeDxl	Changes the drive mode of connected Dynamixel motors
operatingModeDxl	Changes the operating mode of Dynamixel motors
lookupDxl	Searches the control table RAM data of Dynamixel motors
checkErrorDxl	Checks for communication errors and returns the communication status of connected Dynamixel motors

Source: developed by the authors.

MATLAB functions that implement the exchange between actuators directly from *Simulink* should also be highlighted (*Table 4*).

The library [14] also contains three classes of basic *Simulink* blocks:

- writing, synchronous writing and fast synchronous writing blocks to the *DYNAMIXEL* actuator;
- blocks of reading, synchronous reading and fast synchronous reading of parameters from the *DYNAMIXEL* actuator;
- models of some *DYNAMIXEL* actuators.

Table 4 – MATLAB functions of the library [14] for communication with Simulink

Function	Comments
fastSyncReadDxlSim	Executes fast sync read for Dynamixel Motors in Simulink
fastSyncWriteDxlSim	Executes fast sync write for Dynamixel Motors in Simulink
syncReadDxlSim	Executes sync read for Dynamixel Motors in Simulink
syncWriteDxlSim	Executes sync write for Dynamixel motors in Simulink
writeDxlSim	Executes write for Dynamixel motors in Simulink

Source: developed by the authors.

Virtual and physical 2DCAM subsystem

Using the *Dynamixel Wizard 2.0* [18], the serial port of the computer was identified and the same baud rate was set for both actuators at 1,000,000 *baud*. The actuators used in this study support the exchange protocol version 1.

On the basis of examples [14], a virtual model of the two-coordinate positioning subsystem of the additional video camera of the UAV was created (*Fig. 2*). The model can be used either in manual positioning task mode, or based on previously developed tasks.

The choice of mode is determined using a virtual toggle switch. In the "Manual Control" position, the additional video camera of the UAV can be directed in the range of $\pm 150^\circ$ along the vertical or horizontal, using the appropriate slider controls (*Vertical Position* or *Horizontal Position*). In the "Scenario" position, setpoints are used from the numerical file *SetTask.mat*, which is pre-created and adjusted using the *Signal Editor Simulink* block.

To visualize the parameters of both actuators, digital meters of position, positioning speed, as well as moments on the motor shaft and temperature of electric drives are used. For this purpose, each of the *V-Measure* and *H-Measure* Simulink subsystems contains the aforementioned basic Simulink blocks for reading certain data from the actuators. Each of these blocks is identical and differs from the others by the parameters of the C-function that is called: *Present Position*, *Present Speed*, *Present Load* or *Present Temperature*. Usually, in these Simulink blocks, according to the actuators used, the parameters of the *AX-18A* actuator are used for vertical positioning, and *AX-12A* for horizontal positioning, which are automatically determined at the model initialization stage using the *findDxl* search function (*Table 3*).

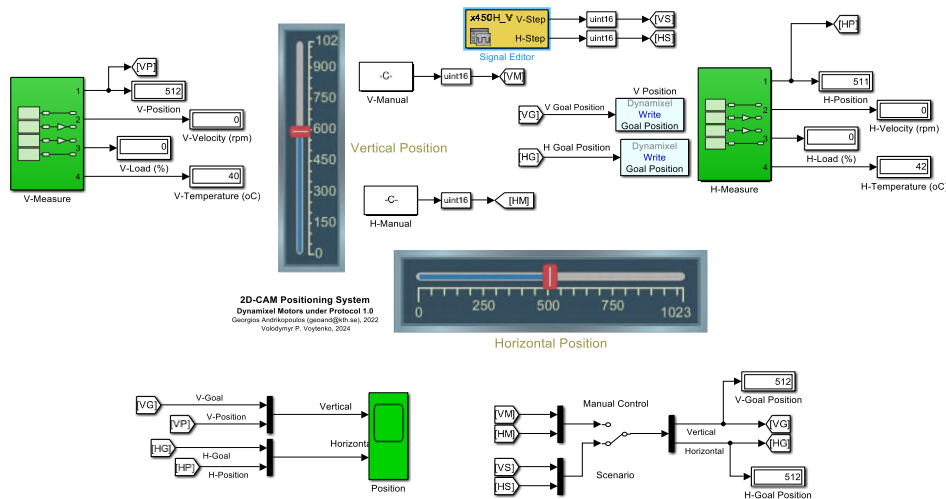


Fig. 2. Virtual part of the 2DCAM subsystem

Source: developed by the authors.

The most important parameters of the system's functioning are the vertical and horizontal positioning setpoint signals, as well as the real values of the position of the UAV's additional video camera obtained through feedback. They are presented visually on the "Position" virtual oscilloscope. Blocks of multiplexers and demultiplexers allow all necessary signals to be displayed simultaneously on one screen in two windows.

Of course, the use of a virtual oscilloscope, other measuring devices, as well as measurement devices, blocks (up to individual electronic components) allow to reduce time and reduce the cost of development at the stage of prototyping a complex technical system.

On Fig. 3 shows screenshots of oscillograms of transient processes (N – ticks from position resolver) in the 2DCAM subsystem, which are obtained from the virtual oscilloscope "Position".

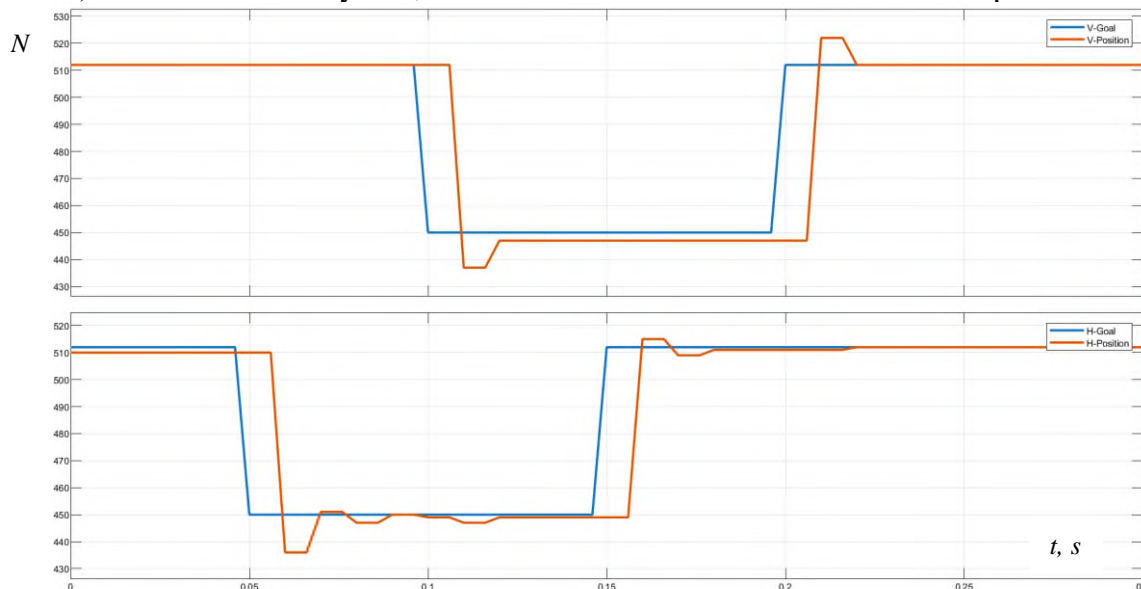


Fig. 3. Transient processes in 2DCAM subsystem

Source: developed by the authors.

As can be seen from Fig. 3, the actuators successfully work out the setpoint signals, and the further task is the development and implementation of virtual controllers in the 2DCAM subsystem, which will allow to optimize transient processes.

On Fig. 4 presents a photo of the hardware part of the 2DCAM subsystem. In addition to an electromechanical unit with two video cameras, a U2D2 interface converter, two actuators for an additional video camera together with a lens with a reduced viewing angle, the photo shows a single-board computer *phyBOARD-Pollux*, as well as other components of a specialized computer system: an auxiliary video monitor and keyboard.

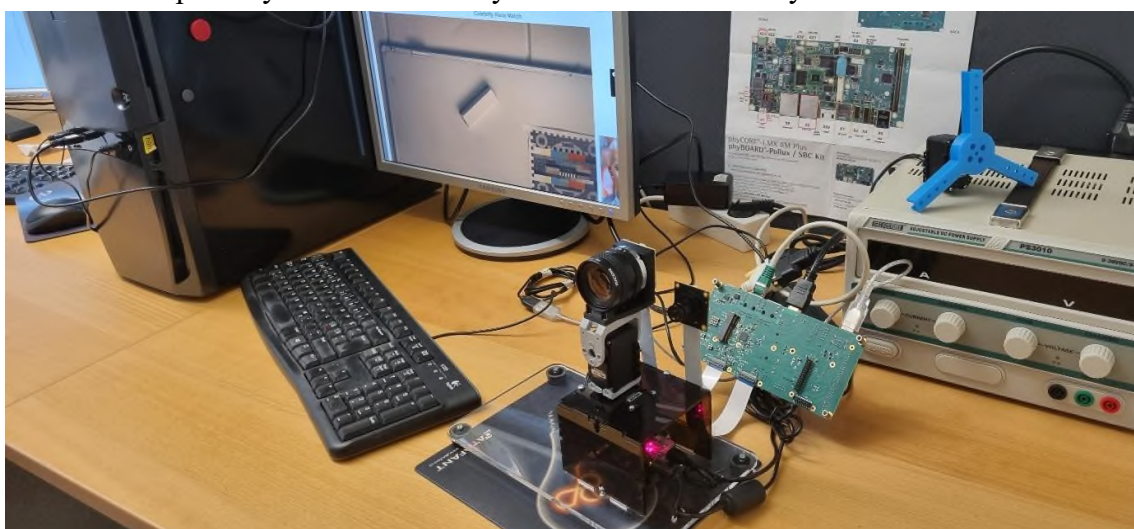


Fig. 4. Hardware part of the 2DCAM subsystem

Source: developed by the authors.

The auxiliary video monitor shows a test image received from the main (navigation) video camera of the UAV, which has undergone digital pre-processing using a processor installed on a single-board computer.

Conclusions. For the first time, a software-hardware complex was developed, which in a single *MATLAB/Simulink* virtual environment allows you to study individual components of a special system for use on board a UAV, as well as their interaction. This system is designed to increase the efficiency of the UAV pilot-operator during long-term search and reconnaissance missions. Components:

- the electromechanical subsystem of the two-coordinate positioning of the additional video camera of the UAV *2DCAM*;
- software subsystem of image analysis and detection of the area of interest;
- other parts.

During the research, the main efforts were concentrated on the creation of the *2DCAM* subsystem. For this purpose, an analysis of possibilities and selection of actuators and software control methods was carried out. The relevant software library has been installed and the available *MATLAB* functions have been classified, which facilitates their use. The *Simulink*-blocks were refined and re-created in accordance with the required range of setpoints of the developed system. These blocks made it possible to confirm the correctness of the choice of hardware and software tools used to create the complex.

Experimental verification of the interaction of the virtual component with the available hardware demonstrated the possibility of two-coordinate positioning of the auxiliary UAV camera at pitch and yaw angles of $\pm 150^\circ$, which meets the requirements. The obtained results allow further efforts to be concentrated on the optimization of motion controllers in terms of accuracy and speed; on image analysis and area of interest detection using solutions and tools such as *MATLAB and Simulink for Control Systems, Image Processing and Computer Vision, Embedded Systems, Machine Learning, Mechatronics* and others.

Careful links to primary sources allow you to use the article, including as a reference, which will quickly help a specialist in the field of robotics and mechatronics to solve a complex of tasks that arise during the development of prototypes of various electromechanical devices. Further research can be done on numerous examples in *MATLAB* in the field of artificial intelligence, including in the *Python* programming language, as well as other, more accurate actuators (for example, *XM430-W210T*, etc.). This allows us to use the advantages provided by the concept of high-level programming of cyber-physical systems [27].

The availability of a large volume of educational literature and the multi-domain nature of *MATLAB/Simulink* allows the results presented in the article to be used in the educational process as well.

Acknowledgements. The authors are highly grateful to the Crafoord Foundation and Scholars at Risk for providing a grant. We also express our gratitude to Andrii Hrechuk for the manufactured mechanical attachment of the additional video camera.

References

1. Beard, R. W., & McLain, T. W. (2012). *Small unmanned aircraft: Theory and practice*. Princeton University Press.
2. *Different types of drones and uses (2024 full guide)*. (2024, January 3). JOUAV. <https://www.jouav.com/blog/drone-types.html>.
3. *Drone impact society*. (2019, June 25). DronesCend. <https://dronesCend.com/blogs/news/impact-dji-drones-on-our-society>.
4. Lee, J. D., Wickens, C. D., Liu, Y. & Boyle, L. N. (2017). *Designing for People: An Introduction to Human Factors Engineering*. Createspace Independent Publishing Platform.
5. Kun, A. L. (2018). *Human-machine interaction for vehicles: Review and outlook*.

6. *Drone operators & pilots*. (n.d.). EASA. <https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/drone-operators-pilots>.
7. *WESCAM MX™-10, air surveillance and reconnaissance*. (n.d.). L3Harris® Fast. Forward. <https://www.l3harris.com/all-capabilities/wescam-mx-10-air-surveillance-and-reconnaissance>
8. Voytenko, V., & Solodchuk, M. (2022). Increasing the speed of analysis of images obtained from unmanned aerial vehicle. *Technical Sciences and Technologies*, (2(28)), 127-137. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2\(28\)-127-137](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-2(28)-127-137).
9. Voytenko, V., Denisov, Y., Yershov, R., Solodchuk, M. (2023). A Conceptual Model for Increasing the Speed of Decision-Making Based on Images Obtained from UAVs. In: Shkarlet, S., et al. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 667*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30251-0_23.
10. Voytenko, V., Olofsson, B., Solodchuk, M., & Denisov, Y. (2023). Components of a system for automatic detection of a zone of interest in images obtained from a UAV. *Technical Sciences and Technologies*, (2(32)), 300-312. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-300-312](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-300-312).
11. Voytenko, V., Solodchuk, M., Denisov, Y., Pisarevskiy, A. (2024). Controllers for Two-Coordinate Positioning of the UAV Auxiliary Video Camera. In: Kazymyr, V., et al. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1091*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67348-1_29.
12. *Products and Services*. (n.d.). MathWorks. https://mathworks.com/products.html?s_tid=nav_products.
13. *Image Processing and Computer Vision*. (n.d.). MathWorks. <https://mathworks.com/solutions/image-video-processing.html>.
14. Andrikopoulos, G. (2024). Dynamixel Library for MATLAB and Simulink. <https://mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/125545-dynamixel-library-for-matlab-and-simulink>.
15. All-in-One Actuator DYNAMIXEL. (n.d.). https://en.robotis.com/shop_en/category.php?ca_id=20.
16. What is DYNAMIXEL? (n.d.). <https://www.dynamixel.com/whatisdxl.php>.
17. DYNAMIXEL Selection Guide. (n.d.). https://en.robotis.com/service/selection_guide.php.
18. Software. (n.d.). *Robotis E-manual*. <https://emanual.robotis.com/docs/en/software/>.
19. DYNAMIXEL SDK. (n.d.). *Robotis E-manual*. https://emanual.robotis.com/docs/en/software/dynamixel/dynamixel_sdk/api_reference/matlab/matlab_porthandler/#matlab.
20. AX-12A. (n.d.). *Robotis E-manual*. <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/ax/ax-12a/>.
21. AX-18A. (n.d.). *Robotis E-manual*. <https://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/ax/ax-18a/>.
22. *IMX 8M plus EVK for AI and embedded vision | PHYTEC*. (n.d.). PHYTEC Messtechnik GmbH. <https://www.phytec.eu/en/produkte/development-kits/phyboard-pollux-ki-kit>.
23. *IMX 8M plus Cortex-A53 / M7 single board computer | PHYTEC*. (n.d.). PHYTEC Messtechnik GmbH. <https://www.phytec.eu/en/produkte/single-board-computer/phyboard-pollux/>.
24. *MIPI CSI-2 camera module for embedded vision | PHYTEC*. (n.d.). PHYTEC Messtechnik GmbH. <https://www.phytec.eu/en/produkte/embedded-imaging/kameramodule/vm-016-phycam-m/>.
25. *5 Mp MIPI CSI-2 camera module for embedded vision | Phytec*. (n.d.). PHYTEC Messtechnik GmbH. <https://www.phytec.eu/en/produkte/embedded-imaging/kameramodule/vm-017-phycam-m/>.
26. U2D2. (n.d.). *Introduction*. ROBOTIS e-Manual. <https://emanual.robotis.com/docs/en/parts/interface/u2d2/>.
27. Voytenko, V. & Yershov, R. (2021). Ultra-high-level programming of the system of electric drives of quadcopters and autonomous robots. *Technical sciences and technologies*, (4(26)), 129-139. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-4\(26\)-129-139](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-4(26)-129-139).

Отримано 20.12.2024

УДК 681.5:004.51

Володимир Павлович Войтенко¹, Максим Олександрович Солодчук²

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки, робототехніки, автоматики та мехатроніки; дослідник кафедри автоматичного керування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна); Лундський університет (Лунд, Швеція)

E-mail: v.voytenko@stu.cn.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1490-0600>

ResearcherID: F-8698-2014 Scopus Author ID: 36167678700

²начальник кафедри військової підготовки

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: maxim_solodchuk@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1162-6784>

ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМИ ДВОКООРДИНАТНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ ДОДАТКОВОЇ ВІДЕОКАМЕРИ БПЛА

БПЛА протягом тривалого часу використовуються для вирішення завдань, коло яких постійно розширюється завдяки досягненням у галузі електронних систем, комп'ютерного зору, штучного інтелекту та ін. Тому подальші дослідження з метою удосконалення БПЛА та його складових мають важливе значення. Однією із суттєвих проблем, пов'язаних із використанням БПЛА, є напруга пілота-оператора під час виконання довготривалих пошукових і розвідувальних місій. Можливе вирішення передбачає встановлення додаткової до навігаційної відеокамери з вузьким кутом зору. Збільшене зображення області інтересу, яке створюється додатковою відеокамерою, допомагає оператору, проте потребує відповідного позиціонування додаткової відеокамери всередині поля зору основної відеокамери. Це позиціонування може здійснюватися за командами, які формує детектор об'єктів.

Мета статті – створення дослідницького програмно-апаратного комплексу, який із середовища MATLAB/Simulink дозволяє керувати позиціонуванням додаткової відеокамери БПЛА за кутами тангажу та ролування. Це дозволяє об'єднати дві підсистеми – позиціонування та аналізу зображення – в єдиному віртуальному середовищі для вирішення проблеми підвищення ефективності роботи пілота-оператора БПЛА під час виконання тривалих пошукових і розвідувальних місій.

У роботі обґрунтовано вибір актуаторних систем на базі двигунів постійного струму DYNAMIXEL, які підключено до персонального комп'ютера через інтерфейс USB. Для реалізації концепції надвисокорівневого програмування актуаторів та використання інструментів середовища MATLAB/Simulink для подальших досліджень використано бібліотеку Dynamixel Library for MATLAB and Simulink, функції якої класифіковані за ознаками, що полегшують їхнє використання. Розроблено віртуально-фізичну підсистему двокоординатного позиціонування додаткової відеокамери БПЛА 2DCAM, результати експериментальних досліджень якої підтверджують справедливості вибору апаратних та програмних засобів, використаних для створення комплексу.

Стаття може бути корисною для розробників кібер-фізичних систем, а також використана в освітньому процесі.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат (БПЛА); аналіз зображень; позиціонування; MATLAB; Simulink.

Рис.: 4. Табл.: 4. Бібл.: 28.

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-4(38)-292-305

УДК 624.042.4:550.34

**Юрій Всеволодович Максим'юк¹, Олександр Володимирович Авдійчук²,
Дмитро Володимирович Лук'янчук³**

¹доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)
E-mail: maksymiuk.iuv@knuba.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5814-6227>

²аспірант кафедри будівельної механіки
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)
E-mail: avdiichuk_ov-2022@knuba.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1035-2084>

³аспірант кафедри будівельної механіки Київський національний університет будівництва і архітектури
E-mail: lukianchuk_dv-2022@knuba.edu.ua ORCID: та <https://orcid.org/0009-0003-1182-2472>

ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СЕЙСМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙ

У контексті глобальної урбанізації та збільшення частоти сейсмічних подій забезпечення сейсмостійкості споруд стає одним із ключових викликів у сфері цивільного будівництва. Аналіз сучасних технічних рішень для підвищення сейсмічної стійкості споруд, з акцентом на інноваційні матеріали, конструктивні системи та технології сейсмоізоляції. Дослідження базується на порівняльному аналізі сучасних інженерних рішень, аналізі літературних джерел та прикладних прикладів з реального будівництва, з використанням систематичного підходу до оцінки їхньої ефективності. Представлено огляд новітніх матеріалів, таких як високоміцний бетон та еластомерні підкладки, конструктивних рішень, зокрема базової ізоляції та систем розсіювання енергії, а також технологій інтеграції сейсмоізоляції в архітектурний дизайн споруд. Аналіз демонструє, що використання цих рішень значно покращує здатність будівель витримувати сейсмічні навантаження. Запропоновано комплексний підхід до інтеграції інноваційних матеріалів та технологій у проектування та будівництво сейсмостійких споруд, що може слугувати основою для подальшого розвитку стандартів у цій сфері.

Ключові слова: сучасні конструкції; інженерні рішення; матеріали; сейсмостійкі технології; моделювання.
Табл.: 4. Бібл.: 18.

Актуальність теми дослідження. Забезпечення сейсмічної стійкості сучасних конструкцій є одним із найважливіших завдань сучасного будівництва. Землетруси залишаються одними з найбільш руйнівних природних явищ, які спричиняють значні людські жертви, економічні втрати та дезорганізацію суспільного життя. Особливо це стосується густонаселених районів і регіонів із розвинутою критичною інфраструктурою, де зростаюча урбанізація та збільшення кількості висотних будівель посилюють потенційні ризики, пов'язані із сейсмічною активністю. Це вимагає впровадження сучасних технічних рішень, які забезпечуватимуть ефективне проектування, будівництво та модернізацію споруд для збереження їхньої функціональності під час сейсмічних впливів та мінімізації руйнувань.

Світова сейсмічна активність, ускладнена непередбачуваністю інтенсивності та часу виникнення землетрусів, підкреслює необхідність застосування надсучасних інженерних практик. Аналіз досвіду катастрофічних подій, таких як землетрус у Тохоку (Японія, 2011 рік), землетруси в Туреччині та Сирії (2023 рік), демонструє масштабні наслідки неналежного сейсмічного проектування та наголошує на важливості використання інноваційних будівельних рішень, орієнтованих на стійкість до землетрусів. Ці події стимулювали розвиток матеріалознавства, інженерії та комп'ютерного моделювання, що створило нові можливості для підвищення сейсмічної стійкості споруд.

В Україні актуальність теми визначається тим, що частина її територій, зокрема Закарпаття, Одеська область, розташовані в сейсмічно активних зонах. Багато будівель у цих регіонах не відповідають сучасним сейсмічним нормам, що становить значну загрозу

для безпеки людей та функціонування інфраструктури. Завдання модернізації таких споруд стає надзвичайно актуальним і потребує інтеграції сучасних технологій, таких як сейсмоізолятори, системи демпфування та адаптивні фундаменти.

Розвиток матеріалів, таких як високоміцний бетон, композитні матеріали та сталі нових марок, дозволяє створювати конструкції, які є одночасно пластичними, міцними та легкими. Інтеграція динамічних гасителів коливань та систем розсіювання енергії забезпечує додатковий захист від руйнівної дії землетрусів. У поєднанні з комп'ютерним моделюванням ці технології дозволяють прогнозувати поведінку конструкцій і мінімізувати ризики. Сейсмостійке проектування відповідає глобальним ініціативам зі створення сталого міського середовища, забезпечуючи безперервність функціонування критичної інфраструктури під час надзвичайних ситуацій. Таким чином, впровадження інноваційних рішень у проектування та модернізацію споруд є важливим чинником соціальної, економічної та екологічної стабільності.

Постановка проблеми. Землетруси становлять постійну й непередбачувану загрозу для безпеки людей, економічної стабільності та цілісності інфраструктури. Незважаючи на значний розвиток будівельних технологій і сучасних інженерних підходів, забезпечення стійкості конструкцій до сейсмічних впливів залишається складним завданням, особливо в регіонах із високою сейсмічною активністю. Трагедії, спричинені великими землетрусами, демонструють серйозність цієї проблеми, адже вони часто супроводжуються численними людськими жертвами, значними матеріальними втратами та довготривалими перебоями у функціонуванні критично важливих систем. Такі події підкреслюють нагальну потребу в розробленні надійних технічних рішень, спрямованих на ефективне зменшення сейсмічних ризиків [1].

Однією з головних перешкод є складність характеристик сейсмічних сил, які мають динамічний, різноспрямований характер і варіюються за інтенсивністю. Сучасні будівлі в міському середовищі, зокрема багатопверхові споруди зі складною геометрією та новітніми матеріалами, хоч і відповідають високим архітектурним і функціональним стандартам, часто характеризуються уразливістю до сейсмічних впливів. Реакція конструкцій на землетруси значною мірою залежить від взаємодії сейсмічних хвиль зі структурними елементами та від нелінійної поведінки матеріалів під дією динамічних навантажень. Це зумовлює необхідність використання передових методів моделювання і точних інженерних підходів для забезпечення довготривалої стійкості.

Додатковою проблемою є геологічні та геотехнічні умови, властиві різним будівельним майданчикам. Зміни у складі ґрунту, стратиграфії та рівнях ґрунтових вод можуть суттєво впливати на передачу й посилення сейсмічних хвиль. Ігнорування цих факторів під час проектування може призвести до руйнування фундаментів, нерівномірного осідання або резонансу конструкцій, що збільшує ризик їхнього обвалу. Сучасна інженерна практика повинна враховувати ці аспекти шляхом детального аналізу кожного об'єкта та впровадження інноваційних фундаментних систем.

Особливу загрозу становить застаріла інфраструктура, яка зберігається в багатьох сейсмічно активних регіонах. Значна кількість будівель і критично важливих об'єктів була зведена до введення сучасних норм сейсмічного проектування, що робить їх вразливими навіть до помірних землетрусів. Модернізація таких споруд стикається з численними викликами – від фінансових і технічних до логістичних. Це ускладнює адаптацію існуючої інфраструктури до сучасних стандартів сейсмостійкості. Для країн, таких як Україна, де частина території належить до зон підвищеної сейсмічної активності, ця проблема набуває особливого значення через наявність застарілих будівель і процесів активної урбанізації.

Водночас впровадження сучасних систем сейсмозахисту, таких як демпфери, ізолятори та адаптивні технології, залишається обмеженим через недостатність ресурсів, технічного досвіду та недоліки в нормативно-правовій базі. Попри підтверджену ефективність цих систем у зменшенні впливу землетрусів, їх використання залишається непослідовним у різних регіонах і масштабах проєктів. Це свідчить про потребу в інтеграції сучасних технологій у стандартизовану будівельну практику та забезпечення їхньої доступності як для нових проєктів, так і для програм модернізації.

Неадекватність чинних норм сейсмічного проєктування для врахування всього спектра потенційних сейсмічних сценаріїв є ще однією значною проблемою. Чинні стандарти часто базуються на спрощених моделях і припущеннях, які не враховують складність реальних землетрусів. Як наслідок, навіть конструкції, що відповідають сучасним нормам, можуть зазнати серйозних пошкоджень або обвалів під час сильних чи тривалих поштовхів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні наукові досягнення в галузі сейсмічної стійкості зосереджені на розробці інноваційних матеріалів, структурних систем та обчислювальних методів для підвищення стійкості сучасних конструкцій. М. Shahjalal, А. К. М. Yahia, А. S. М. Morshed та N. I. Tanha [3] у своїй роботі досліджують інновації та виклики в проєктуванні сейсмостійких будівель. Вони підкреслюють важливість використання новітніх матеріалів і технологій для створення споруд, здатних витримувати сейсмічні впливи у високоризикових регіонах.

А. А. Mohamud, F. E. Aitettaleb, S. Z. Elabidine та M. R. U. Isalm [4] акцентують увагу на інтеграції сучасних технологій, таких як демпфери та сейсмоізолятори, у будівництво. У дослідженні запропоновано інноваційні підходи до застосування цих технологій для підвищення стійкості як нових конструкцій, так і модернізованих об'єктів, особливо в сейсмічно активних регіонах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У галузі матеріалознавства такі науковці, як В. Глуховський, Ю. Немчинов, М. Мар'єнков, К. Бабік [5] та В. Ясній, В. Будз [6], провели дослідження вискоефективних матеріалів для сейсмостійких конструкцій. Їхні роботи висвітлюють важливість сучасних композитів, таких як полімери, армовані вуглецевим волокном (CFRP), які демонструють високе співвідношення міцності до ваги і відмінні властивості розсіювання енергії. Такі матеріали дедалі частіше застосовуються для модернізації існуючих конструкцій та будівництва легких і стійких будівель. Наукові здобутки цих дослідників підкреслюють необхідність інтеграції новітніх матеріалів у практику проєктування для ефективного зменшення сейсмічних ризиків.

Структурні інновації також перебувають у центрі уваги останніх досліджень. Вагомий внесок у вивчення поведінки сталевих і композитних конструкцій під дією сейсмічних навантажень зробили Г. Гетун, В. Колякова, А. Соломін, І. Безклубенко [7]. Їхні дослідження пластичності та здатності поглинання енергії сталевих елементів конструкцій стали основою для розроблення стратегій проєктування будівель і мостів.

У сфері технологій сейсмічної ізоляції та демпфування О. Гаврилюк, Д. Нечипоренко, В. Жук [8] розглянули застосування фундаментних ізоляторів та додаткових систем демпфування. Їхні дослідження еластомерних і ковзних підшипників демонструють ефективність цих рішень в ізоляції будівель від коливань ґрунту, що значно зменшує передачу сейсмічних сил на надбудови. Науковці також вивчають гібридні системи ізоляції, які поєднують кілька механізмів демпфування для досягнення оптимальної роботи в різних сейсмічних умовах.

Методи комп'ютерного моделювання значно вдосконалено завдяки внеску Д. Мальчицького та В. Фурмана [9]. Їхні дослідження аналізують сучасні алгоритми моделювання сейсмічних реакцій в умовах невизначеності. Ці моделі інтегрують геологічні дані,

структурні властивості та поведінку матеріалів для забезпечення точних прогнозів сейсмічних характеристик. Результати таких досліджень важливі для розроблення імовірнісних підходів до проектування, які враховують невизначеність сейсмічної небезпеки та властивостей матеріалів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на значний прогрес у сейсмостійкому будівництві, деякі аспекти забезпечення сейсмічної стійкості сучасних споруд залишаються недостатньо дослідженими. До них належать оптимізація гібридних систем сейсмічної ізоляції для висотних будівель у регіонах зі складною структурою сейсмічних хвиль і розробка економічно ефективних методів модернізації старіючих конструкцій в умовах обмежених ресурсів. Натепер нами здійснюється внесок через розробку обчислювальних моделей для моделювання роботи гібридної ізоляції під різноспрямованими сейсмічними навантаженнями, а також через створення інноваційних матеріалів для доступного зміцнення конструкцій. Ці зусилля спрямовані на подолання недоліків поточних практик, пропонуючи практичні та масштабовані підходи до підвищення стійкості сучасних та існуючих конструкцій.

Метою дослідження є аналіз сучасних інноваційних технічних рішень для підвищення сейсмостійкості будівель з акцентом на інтеграцію цих рішень у проектування та модернізацію конструкцій, враховуючи специфіку сейсмічно активних регіонів України. Особлива увага приділяється адаптації високоміцних матеріалів, впровадженню систем демпфування, сейсмічної ізоляції та використанню комп'ютерного моделювання для передбачення поведінки конструкцій під час землетрусів.

Виклад основного матеріалу. Сейсмічна стійкість конструкцій є важливим елементом сучасного будівництва, особливо в районах, схильних до землетрусів. Забезпечення цілісності конструкції під час сейсмічних навантажень вимагає комплексного вивчення поведінки різних структурних систем, причин пошкоджень під час сейсмічних явищ та принципів, що покладені в основу проектування сейсмостійких будівель. Конструкції можна умовно поділити на жорсткі, гнучкі та комбіновані системи, кожна з яких по-різному реагує на сейсмічні коливання [10]. До жорстких конструкцій, які зазвичай мають високу жорсткість, належать будівлі із залізобетону або цегляної кладки. Такі конструкції ефективно опираються деформації, але їхня жорсткість робить їх вразливими до крихких пошкоджень, особливо в слабких місцях, таких як стики або з'єднання. При дії горизонтальних сейсмічних сил жорсткі конструкції зазнають значних напружень на зсув, що призводить до утворення тріщин або руйнування, якщо межа міцності матеріалу на зсув перевищується. Вертикальні сили можуть ще більше посилити ці напруження, зокрема в будівлях з великими сконцентрованими навантаженнями.

Натомість гнучкі конструкції спроектовані так, що можуть витримувати більші деформації, не отримуючи при цьому суттєвих ушкоджень. Будівлі зі сталевим каркасом і легкі дерев'яні конструкції є типовими прикладами. Такі конструкції за рахунок контрольованої деформації поглинають сейсмічну енергію, зменшуючи ймовірність їх катастрофічного пошкодження. Але їхня гнучкість може призвести до значних зсувів під час сильних землетрусів, що може спричинити вторинні небезпеки, такі як обвал неконструктивних елементів або контакт з сусідніми будівлями. Важливою проблемою гнучких систем є явище резонансу, яке виникає, коли власна частота конструкції збігається з переважаючою частотою сейсмічних хвиль. Резонанс збільшує динамічну реакцію, викликаючи екстремальні деформації, які можуть перевищувати проектні межі конструкції.

Комбіновані конструкції поєднують жорсткість певних елементів з гнучкістю інших, що дозволяє збалансувати жорсткість і пластичність. Наприклад, залізобетонні ядра в поєднанні зі сталевими рамами або системами кріплення часто використовуються у висотних будівлях. Такі системи спрямовані на оптимізацію розсіювання енергії та обмеження

деформацій, покращуючи загальні сейсмічні характеристики. Комбіновані системи потребують уважного проектування для забезпечення сумісності між жорсткими та гнучкими компонентами, оскільки відмінності в їхніх динамічних реакціях можуть спричинити внутрішні напруження або локальні руйнування.

Руйнування конструкцій під час сейсмічних подій є багатофакторними, часто пов'язаними із взаємодією різних чинників [11]. Значну роль відіграють динамічні навантаження, зокрема, горизонтальні, вертикальні та резонансні сили. Горизонтальні навантаження виникають внаслідок бокового руху ґрунту, який створює інерційні сили, пропорційні масі споруди. Такі сили можуть викликати напруження згину, зсуву і скручування, які перевищують здатність матеріалу витримувати навантаження. Вертикальні сейсмічні сили, зазвичай менші за величиною, можуть мати виражений вплив на конструкції з нерівномірним розподілом маси або недостатньою вертикальною здатністю витримувати навантаження. Нелінійність деформації матеріалу також є важливим фактором, що впливає на сейсмічну реакцію. Багато будівельних матеріалів, таких як бетон і сталь, проявляють нелінійну поведінку під впливом високих навантажень, зокрема, піддаються деформації, розтріскуванню або пластичній деформації. Нелінійні реакції можуть призвести до розсіювання енергії і перерозподілу напружень, але за відсутності належного контролю можуть також прискорити прогресуюче руйнування.

Класифікація конструкцій за сейсмічною стійкістю та їхню реакцію на сейсмічні навантаження представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Класифікація будівельних конструкцій за сейсмічною стійкістю [10-11]

Тип	Приклади	Характеристики сейсмічної реакції	Проблеми
Жорсткі конструкції	Залізобетон, цегляна кладка	Висока жорсткість, обмежена деформація; стійкість до зсувних та згинальних сил	Схильність до крихкого руйнування; концентрація напружень у слабких місцях
Гнучкі конструкції	Сталеві рами, дерев'яні будівлі	Низька жорсткість, висока деформація; ефективне розсіювання енергії	Великі переміщення; резонансні ефекти; потенціал для неструктурних пошкоджень
Комбіновані конструкції	Сталезалізобетонні ядра	Баланс між жорсткістю та гнучкістю; оптимізоване розсіювання енергії	Сумісність динамічних реакцій; локалізовані напруження на межі між жорсткими та гнучкими елементами

Вивчення причин руйнувань під час сейсмічних подій має важливе значення для вдосконалення проектування та будівництва сейсмостійких споруд. Резонансні ефекти, зокрема, підкреслюють необхідність динамічного аналізу у процесі проектування. Це передбачає визначення власних частот конструкції та забезпечення їх значної відмінності від переважаючих частот очікуваних сейсмічних хвиль. Для оцінки динамічної поведінки конструкцій і виявлення потенційних режимів руйнування застосовуються сучасні обчислювальні інструменти та експериментальні випробування.

Моделювання сейсмічного впливу на будівельні конструкції є одним із ключових компонентів сейсмостійкого будівництва, оскільки це дає змогу інженерам передбачати та зменшувати вплив сейсмічних сил на споруди. Досягнення в обчислювальних методах і методах збору даних суттєво підвищили точність і надійність таких моделей. Серед найпоширеніших методів чисельного аналізу в цій галузі є метод скінченних елементів (МСЕ), який забезпечує потужну основу для моделювання складних взаємодій між сейсмічними силами та структурними системами.

Метод скінченних елементів полягає у поділі конструкції на дискретні елементи, кожен із яких описується математичними рівняннями, що відображають його поведінку під дією різних навантажень. Отримані рівняння розв'язуються ітераційно, що дозволяє визначити реакцію всієї конструкції на сейсмічні впливи. Цей метод дає змогу проводити детальний аналіз напружень, деформацій і переміщень, що є важливим для виявлення

слабких місць і оптимізації проєкту. МСЕ застосовується як для лінійного, так і для нелінійного аналізу, враховуючи зміни властивостей матеріалів під впливом екстремальних навантажень, таких як плинність або розтріскування в залізобетоні чи пластичні деформації у сталі.

Сейсмічні карти та інженерно-геологічні дослідження в поєднанні з кількісними методами відіграють важливу роль у моделюванні сейсмічних ефектів. Сейсмічні карти надають дані про сейсмічність регіону, зокрема про місцезнаходження і магнітуду історичних землетрусів, а також про інтенсивність і частоту підземних рухів. Ці карти ґрунтуються на геологічних і сейсмологічних дослідженнях, що містять інформацію про лінії розломів, тектонічну активність та стан ґрунтів.

Використовуючи сейсмічні карти, інженери можуть оцінити очікувані сейсмічні сили, з якими споруда може зіткнутися протягом свого терміну експлуатації. Це є основою для вибору параметрів проєктування. Карти сейсмічного районування поділяють територію на зони залежно від рівня сейсмічної небезпеки, встановлюючи будівельні норми та методи проєктування, які забезпечують належний рівень сейсмостійкості споруд відповідно до їхнього розташування.

Інженерно-геологічні дослідження є важливим інструментом для підвищення точності моделювання сейсмічних ефектів, оскільки вони забезпечують глибоке розуміння специфічних умов ґрунту та підземних шарів на конкретній ділянці. Під час таких досліджень аналізуються параметри, як-от тип ґрунту, стратиграфія, рівень ґрунтових вод і динамічні характеристики, включно зі швидкістю зсувних хвиль та коефіцієнтами демпфування. Поведінка ґрунту під впливом сейсмічного навантаження, яка може включати явища розрідження, посилення або ослаблення сейсмічних хвиль, є одним із ключових чинників, що враховується у структурному аналізі. Наприклад, м'які ґрунти можуть підсилювати інтенсивність руху ґрунту, збільшуючи навантаження на конструктивні елементи споруд, тоді як водонасичені ґрунти здатні втрачати несучу здатність через розрідження під час сильних струсів. Інтеграція цих даних у чисельні моделі дозволяє враховувати реальні умови об'єкта та знижувати ризик недооцінки можливих загроз.

Поєднання кількісних методів з використанням сейсмічних карт і даних інженерно-геологічних досліджень створює основу для комплексного моделювання. Такі моделі враховують багатовимірність сейсмічних сил, включно з горизонтальними та вертикальними компонентами, а також взаємодію споруд із навколишніми ґрунтами. Сучасні обчислювальні технології дозволяють відтворювати складні сценарії, такі як нелінійна динамічна реакція конструкцій на рух ґрунту або зміни в сейсмічних характеристиках через взаємодію між ґрунтом і спорудою. Використання імовірнісного аналізу сейсмічної небезпеки (PSHA) забезпечує врахування невизначеностей, пов'язаних із сейсмічним моделюванням, включно з варіаціями інтенсивності, частоти та тривалості підземних рухів.

Сейсмічні карти також є ключовим компонентом під час оцінювання ризиків. Вони надають інформацію про регіональну сейсмічність, охоплюючи дані про історичні землетруси, магнітуду, частоту та інтенсивність підземних рухів. Карти базуються на геологічних і сейсмологічних дослідженнях, які враховують лінії розломів, тектонічну активність і фізико-механічні властивості ґрунтів. Завдяки цьому інженери отримують можливість оцінювати очікувані сейсмічні навантаження на споруди протягом їхнього життєвого циклу та вибирати оптимальні проєктні параметри. Регіональне сейсмічне зонування дозволяє класифікувати території за рівнем небезпеки та розробляти будівельні норми, адаптовані до умов конкретного місця.

У табл. 2 наведено ключові компоненти та підходи, які використовуються для сучасного сейсмічного моделювання.

Розвиток комп'ютерного моделювання та технологій збору даних постійно вдосконалює точність сейсмічного аналізу. Інтеграція сейсмічних карт високої роздільної здатності, новітніх геотехнічних досліджень та сучасних чисельних методів дозволяє інженерам проектувати конструкції, стійкі до сейсмічних впливів. Це забезпечує надійність і безпеку споруд у сейсмонебезпечних регіонах. Поєднання передових підходів уможливує точний прогноз сейсмічної реакції будівель, що дає змогу впроваджувати превентивні заходи для підвищення їхньої стійкості та мінімізації ризику катастрофічних руйнувань під час землетрусів.

Таблиця 2 – Сучасні компоненти сейсмічного моделювання [12-13]

Компонент	Характеристика	Основні сфери застосування
Метод скінченних елементів	Чисельний метод поділу конструкцій на дискретні елементи для моделювання поведінки під дією сейсмічних навантажень	Детальний аналіз напружено-деформованого стану, виявлення слабких місць, оптимізація проектування конструкцій
Сейсмічні карти	Надають дані про сейсмічність, лінії розломів та характеристики руху ґрунту	Оцінка розрахункових сейсмічних навантажень, сейсмічне районування, відповідність будівельним нормам
Інженерно-геологічні дослідження	Оцінка специфічних умов ґрунту та підземних вод на ділянці	Оцінка поведінки ґрунту під дією сейсмічних навантажень, врахування взаємодії ґрунту з конструкцією

Сейсмічна стійкість є основною вимогою до споруд у регіонах з високим рівнем сейсмічної небезпеки. Це вимагає інтеграції прогресивних технічних рішень, що охоплюють вибір матеріалів, конструктивне проектування та впровадження інноваційних технологій. Вибір матеріалів і конструктивних елементів є ключовим чинником у протистоянні сейсмічним навантаженням [14]. Високоякісний бетон та арматура активно застосовуються для підвищення міцності та пластичності структурних компонентів. Залізобетон здатний витримувати як стискаючі, так і розтягувальні навантаження, а правильне розташування арматури забезпечує ефективне розсіювання енергії та запобігає крихким руйнуванням.

Використання сталевих каркасів у будівництві забезпечує високу гнучкість і пластичність конструкцій. Це дозволяє спорудам деформуватися без руйнування під впливом динамічних навантажень, характерних для сейсмічних подій. Здатність сталі поглинати й розсіювати енергію робить її незамінним матеріалом для будівництва висотних будівель та інженерних споруд.

Останніми роками значний інтерес викликають легкі композитні матеріали завдяки їхньому високому співвідношенню міцності до ваги та довговічності. Полімери, армовані вуглецевим волокном (CFRP), та полімери, армовані скловолокном (GFRP), широко використовуються для модернізації існуючих конструкцій або як основні компоненти у новому будівництві. Невелика вага цих матеріалів знижує інерційні сили під час землетрусу, а їхня висока пластичність забезпечує стійкість до деформацій [15].

Інтеграція демпферів і систем сейсмічної ізоляції значно покращує сейсмічні характеристики будівель завдяки поєднанню інновацій у матеріалах із передовими інженерними рішеннями. Демпфери, які поглинають і розсіюють сейсмічну енергію, мають кілька типів, кожен із яких вирізняється своїми особливостями. В'язкі демпфери функціонують на основі камер, заповнених рідиною, які перетворюють кінетичну енергію в теплову, ефективно зменшуючи амплітуду коливань. Фрикційні демпфери використовують поверхні ковзання, що розсіюють енергію за рахунок сили тертя, забезпечуючи при цьому простоту конструкції та довговічність. Металеві демпфери, виготовлені здебільшого зі сталі, працюють шляхом пластичної деформації під навантаженням, розсіюючи енергію через зміну форми матеріалу. Ці пристрої зазвичай встановлюють у каркасах конструкцій або в критично важливих з'єднаннях для контролю зсувів і зменшення пошкоджень.

Сейсмічні ізолятори забезпечують додатковий рівень захисту, ізолюючи конструкцію від коливань ґрунту завдяки гнучким шарам або опорам, розташованим між фундаментом і надбудовою. Найпоширеніші ізолятори включають еластомерні підшипники, підшипники ковзання та підшипники зі свинцевим сердечником, кожен із яких пристосований до специфічних структурних вимог. Їх встановлення потребує ретельного проєктування для забезпечення стабільності та відповідності проєкту будівлі. Сучасні конструкції нерідко використовують гібридні системи, які комбінують демпфери та ізолятори для досягнення оптимальної ефективності в різних сейсмічних сценаріях.

Інноваційні технології лежать в основі створення нових рішень для підвищення сейсмічної стійкості. Наприклад, динамічні гасителі коливань налаштовані на певні частоти сейсмічних хвиль, що дає змогу ефективно нейтралізувати резонансні ефекти. Такі системи особливо корисні для високих або тонких конструкцій, таких як вежі чи мости, де резонанс може стати значною загрозою. Ще одним важливим досягненням є розробка систем «активного фундаменту», які застосовують датчики та приводи для моніторингу та регулювання реакції споруди в реальному часі. Такі системи можуть адаптуватися до різних рівнів сейсмічної інтенсивності, активно перерозподіляючи сили або змінюючи жорсткість конструкції, забезпечуючи її стабільність навіть за непередбачуваних умов.

Адаптивні конструкції, що поєднують «розумні» матеріали та автоматизовані системи управління, уособлюють майбутнє сейсмічної інженерії. Ці конструкції здатні змінювати свої властивості, такі як жорсткість чи демпфування, у відповідь на зовнішні подразники, оптимізуючи свою поведінку під час сейсмічних подій. Таким чином, поєднання традиційних і передових технологій у галузі сейсмічної інженерії забезпечує високу ефективність захисту будівель у сейсмонезбезпечних регіонах. У табл. 3 наведені технічні рішення, що обговорювалися, та їхні ключові характеристики.

Таблиця 3 – Технологічні рішення для забезпечення сейсмостійкості будівель [14-15]

Технічні рішення	Характеристика	Головні переваги
Високоякісний бетон і сталь	Використання залізобетону та сталі для забезпечення міцності та пластичності	Розсіювання енергії, стійкість до стискаючих і розтягуючих навантажень
Легкі композитні матеріали	Використання вуглепластику та склопластику для модернізації та первинного будівництва	Зменшені інерційні сили, високе співвідношення міцності до ваги
В'язкі демпфери	Наповнені рідиною пристрої, що перетворюють кінетичну енергію в теплову	Зменшення амплітуди вібрації, ефектне розсіювання енергії
Фрикційні демпфери	Поверхні ковзання, що розсіюють енергію за рахунок тертя	Простота, довговічність і легкість в обслуговуванні
Сейсмічні ізолятори	Гнучкі шари, що відокремлюють конструкції від коливань ґрунту	Зменшення передачі коливань ґрунту, захист критично важливих компонентів
Динамічні гасителі коливань	Налаштовані системи, що протидіють певним сейсмічним частотам	Пом'якшення резонансних ефектів, стабільність для високих і тонких конструкцій
Активні фундаменти	Системи з датчиками і приводами для регулювання реакції конструкції в реальному часі	Адаптація в реальному часі, підвищена стійкість в умовах змінної сейсмічної інтенсивності
Адаптивні конструкції	Розумні матеріали та системи, які змінюють структурні властивості під час сейсмічних подій	Оптимізація жорсткості та демпфування, футуристична стійкість

Реалізація технічних рішень у сфері сейсмостійкого будівництва вимагає комплексного підходу, що поєднує знання матеріалознавства, будівельної інженерії та сучасних технологій. Досягнення в комп'ютерному моделюванні та системах моніторингу в режимі реального

часу значно підвищують ефективність таких рішень. Інтегруючи високоефективні матеріали, складні системи демпфування та ізоляції, а також інноваційні адаптивні технології, інженери постійно вдосконалюють сейсмічну стійкість сучасних конструкцій. Застосування цих заходів є критично важливим для забезпечення безпеки населення та зменшення економічних втрат у сейсмонебезпечних регіонах, що підкреслює значення постійних досліджень і розробок у сфері сейсмостійкості [16].

Розробка сейсмостійких конструкцій є багатопрофільним процесом, який об'єднує геологічні дослідження, інженерні методи та інноваційні технології для створення споруд, здатних протистояти сейсмічним впливам. Цей процес починається з ретельного аналізу вихідних даних, які забезпечують основу для ухвалення обґрунтованих рішень на кожному етапі проектування. Важливими складовими є геологія та сейсмічність. Геологічні дослідження дозволяють визначити фізичні та механічні властивості ґрунту, включаючи стратиграфію, рівень ґрунтових вод і схильність до розрідження, що впливає на статичну взаємодію споруди з основою під час землетрусу. Сейсмічні дослідження включають аналіз регіональної сейсмічної активності, історичних даних про землетруси, близькості ліній розломів і очікуваних параметрів руху ґрунту, таких як прискорення, швидкість і зміщення. Поєднання цих даних дозволяє інженерам створювати моделі сейсмічної небезпеки для конкретної ділянки, що визначає вибір проектних параметрів.

На наступному етапі здійснюється вибір концептуального проекту та попередні розрахунки. Визначаються основні характеристики планування та конструктивної системи, акцентуючи увагу на простоті й симетрії структурного плану для мінімізації торсійних ефектів під час землетрусів. Попередні розрахунки спрямовані на оцінку ключових параметрів, таких як власні частоти конструкції, сили зсуву основи та розподіл напружень за умов сейсмічних навантажень. Ці розрахунки стають базою для уточнення проекту на наступних етапах, забезпечуючи відповідність нормам сейсмічного проектування. Концептуальний проект передбачає також вибір матеріалів і методів будівництва, які збалансують міцність, пластичність і технологічність. У пріоритеті використовуються такі матеріали, як високоміцний бетон, конструкційна сталь та композити, що забезпечують високі характеристики в умовах динамічних навантажень.

Врахування сейсмічних навантажень є ключовим аспектом сейсмостійкого проектування. Інженери повинні враховувати різні сценарії землетрусів, включаючи помірні, сильні та рідкісні, щоб забезпечити безпеку й функціональність споруд за будь-яких умов. Моделювання навантажень передбачає імітацію впливу руху ґрунту на конструкцію, враховуючи горизонтальні й вертикальні компоненти, а також потенційні резонансні ефекти. Для створення детальних моделей, які враховують нелінійну поведінку матеріалів і структурних елементів під впливом сейсмічного навантаження, використовуються сучасні обчислювальні інструменти, такі як метод скінченних елементів. Стандартизовані методи перевірки стійкості, викладені в нормативних кодексах сейсмічного проектування, надають рекомендації для оцінки ключових критеріїв ефективності, включаючи міцність, жорсткість і пластичність. Ці норми також визначають такі фактори, як коефіцієнти модифікації реакції та категорії важливості, що дозволяє адаптувати проектні вимоги до конкретного призначення будівлі та чисельності її мешканців. Зазвичай оцінка стійкості включає використання динамічного аналізу, наприклад спектрального аналізу або методів часової динаміки, які допомагають прогнозувати поведінку конструкції за реальних сейсмічних умов [17].

Адаптація існуючих будівель до сучасних сейсмічних стандартів є ще одним важливим напрямом сейсмостійкого будівництва, особливо в регіонах із застарілою інфраструктурою [18]. Методи реконструкції та зміцнення спрямовані на поліпшення сейсмічних

характеристик старих будівель, які спочатку не були розроблені для витримування землетрусів або які з часом зазнали погіршення технічного стану. Поширені методи зміцнення включають додавання залізобетонної або сталеві арматури для підвищення бічного опору, використання полімерів, армованих волокном, для модернізації колон і балок, а також встановлення систем ізоляції фундаменту, що дозволяє зменшити вплив коливань ґрунту на будівлю. Такі підходи не лише покращують міцність, а й забезпечують пластичність конструкцій, знижуючи ймовірність обвалення під час землетрусів. Практичне впровадження цих методів має широке застосування у світовій практиці. Зокрема, у таких країнах, як Японія, США та Італія, значні ресурси було інвестовано в модернізацію історичної та критично важливої інфраструктури для підвищення її сейсмічної стійкості.

В Україні реалізуються заходи з адаптації існуючих будівель до сучасних сейсмічних вимог, зокрема в південно-західних регіонах, де ризики є підвищеними через близькість до зони Карпатського розлому. Помітні проекти включають зміцнення лікарень, шкіл і житлових будинків у таких містах, як Чернівці та Одеса. Ці ініціативи часто здійснюються у співпраці між місцевими органами влади, науковими установами та міжнародними організаціями, що підкреслює важливість скоординованого підходу до мінімізації сейсмічних ризиків.

Досвід, отриманий у межах цих проектів, вказує на необхідність запровадження надійних технічних стандартів, забезпечення достатнього фінансування та проведення інформаційних кампаній серед громадськості. Такий комплексний підхід є ключовим для успішної реалізації програм модернізації, спрямованих на довгострокове зниження загроз від сейсмічних впливів.

У табл. 4 подано узагальнені ключові аспекти сейсмостійкого проектування та заходів з адаптації.

Таблиця 4 – Головні аспекти сейсмостійкого проектування і заходів з адаптації будівель [16-18]

Аспект	Характеристика	Головні завдання
Аналіз вихідних даних	Геологічні та сейсмічні дослідження для визначення параметрів небезпеки на конкретній ділянці	Точна оцінка небезпеки, проектування фундаменту та оптимізація конструкції
Вибір конструкції та попередні розрахунки	Розробка планування, конструктивної системи та вибір матеріалів	Простота, симетрія та попередня оцінка сейсмічних характеристик
Моделювання навантаження та перевірка стійкості	Моделювання сейсмічних впливів за допомогою обчислювальних інструментів та дотримання норм проектування	Забезпечення міцності, жорсткості та пластичності; прогнозування реальних характеристик
Адаптація існуючих будівель	Реконструкція та зміцнення старих будівель відповідно до сучасних сейсмічних вимог	Підвищення безпеки, продовження терміну експлуатації та зменшення сейсмічних ризиків

Конструювання сейсмостійких споруд вимагає комплексного підходу, що включає ретельний аналіз даних, застосування сучасних методів моделювання та впровадження інноваційних рішень для укріплення конструкцій. Урахування сейсмічних ризиків на всіх етапах проектування та адаптація існуючої інфраструктури до сучасних стандартів забезпечують підвищення безпеки населення та мінімізацію наслідків землетрусів. Інженери, працюючи над зниженням вразливості до сейсмічних впливів, роблять вагомий внесок у забезпечення стійкості споруд. Отже, впровадження цих принципів, підтримане постійними дослідженнями та міжнародною співпрацею, сприяє подальшому розвитку сфери сейсмостійкого будівництва. Такий підхід дозволяє ефективно реагувати на виклики, пов'язані з сейсмічною небезпекою, та підвищувати рівень захищеності в регіонах, що перебувають у зоні підвищеного ризику.

Висновки. Результати дослідження технічних аспектів сейсмостійкості сучасних конструкцій свідчать про необхідність комплексного підходу, що включає використання інноваційних матеріалів, передових інженерних методів і надійних підходів до проектування. Сучасні матеріали, такі як пластичний бетон і сталь, демонструють високу ефективність у поглинанні та розсіюванні сейсмічної енергії, що мінімізує можливість пошкодження конструкцій. Завдяки впровадженню передових методів моделювання, таких як аналіз методом скінченних елементів і сейсмічне моделювання, інженери отримують змогу прогнозувати поведінку споруд під дією навантажень, оптимізуючи проекти для забезпечення їхньої стійкості. Ці технології в поєднанні зі строгим дотриманням сейсмічних норм і стандартів створюють передумови для формування безпечної та довговічної інфраструктури.

Інтеграція інноваційних систем, таких як ізоляція фундаменту й пристрої для розсіювання енергії, є важливим чинником підвищення сейсмостійкості конструкцій. Системи ізоляції фундаменту дозволяють ефективно відокремити будівлю від ґрунтових коливань, істотно знижуючи передачу сейсмічної енергії на споруду. Демпфери, зокрема, забезпечують ефективне розсіювання енергії через перетворення кінетичної енергії в теплову, що значно зменшує вплив сейсмічних сил на конструкцію. Практика впровадження цих систем у сучасні проекти підтверджує їхню здатність суттєво підвищувати сейсмічну стійкість, що сприяє зниженню матеріальних втрат і забезпеченню безпеки.

Подальший розвиток технологій сейсмостійкості пов'язаний із впровадженням адаптивних конструкцій, здатних динамічно реагувати на сейсмічні явища. Такі конструкції, розроблені з урахуванням сучасних технологій і матеріалів, відкривають нові можливості для інженерного забезпечення безпеки в умовах підвищеного сейсмічного ризику.

Список використаних джерел

1. Allen, R. M. Global growth of earthquake early warning / R. M. Allen, M. Stogaitis // *Science*. – 2022. – Vol. 375(6582). – Pp. 717-718. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abl5435>.
2. Shaffril, H. A. M. Speaking of the devil: a systematic literature review on community preparedness for earthquakes / H. A. M. Shaffril, A. A. Samah, S. Kamarudin // *Natural Hazards*. – 2021. – Vol. 108(3). – Pp. 2393-2419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04867-7>.
3. Earthquake-Resistant Building Design: Innovations and Challenges / M. Shahjalal, A. K. M. Yahia, A. S. M. Morshed, N. I. Tanha // *Global Mainstream Journal of Innovation, Engineering & Emerging Technology*. – 2024. – Vol. 3(4). – Pp. 101-119. DOI: <https://doi.org/10.62304/jieet.v3i04.209>.
4. Integrating Modern Technologies for Earthquake-Resistant Buildings / A. A. Mohamud, F. E. Aitettaleb, S. Z. Elabidine, M. R. U. Islam // *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*. – 2024. – Vol. 2(6). – Pp. 403-412. DOI: [https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2\(6\).34](https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2(6).34).
5. Сейсмостійке будівництво в Україні: стан експериментально-теоретичних досліджень та розробка нормативної бази / В. Глуховський, Ю. Немчинов, М. Мар'єнков, К. Бабік // *Наука та будівництво*. – 2023. – Вип. 37(3). – С. 42-51. DOI: <https://doi.org/10.33644/313-6679-3-2023-5>.
6. Ясній, В. П. Пристрої та системи захисту будівель та споруд від дії циклічних навантажень: сучасний стан та перспективи / В. П. Ясній, В. І. Будз // *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*. – 2023. – Вип. 1(36). – С. 105-114. DOI: <https://doi.org/10.15421/4223109>.
7. Особливості проектування сталевих сейсмостійких конструкцій висотних будівель / Г. Гетун, В. Колякова, А. Соломін І. Безклубенко // *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. – 2022. – Вип. 11. – С. 18-31. DOI: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.18-31>.
8. Гаврилюк, О. Напружено-деформований стан конструкцій будинку з врахуванням можливої локальної відмови елемента / О. Гаврилюк, Д. Нечипоренко, В. Жук // *Bases and Foundations*. – 2024. – Вип. 48. – С. 100-115. DOI: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.48.2024.100-115>.
9. Малицький, Д. Комп'ютерне моделювання теплового режиму геологічного і геофізичного середовищ / Д. Малицький, В. Фурман // *Електроніка та інформаційні технології*. – 2023. – Вип. 15. – С. 48-58. DOI: <https://doi.org/10.30970/eli.15.5>.
10. Integrated rehabilitation of reinforced concrete buildings: Combining seismic retrofit by means of low-damage exoskeleton and energy refurbishment using multi-functional prefabricated facade / I. Sebastiani, S. D'Amore, R. Pinotti, S. Pampanin // *Journal of Building Engineering*. – 2024. – Vol. 95. – Article ID: 110368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110368>.

11. Framework for seismic risk analysis of engineering structures considering the coupling damage from multienvironmental factors / J. L. Zhang, G. Li, D. H. Yu, Z. Q. Dong // *Journal of Structural Engineering*. – 2024. – Vol. 150(10). – Article ID: 04024147. DOI: <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-13340>.
12. Nonlinear modeling of the seismic response of masonry structures: critical review and open issues towards engineering practice / S. Cattari, B. Calderoni, I. Calì, G. Camata, S. de Miranda, G. Magenes A. Saetta // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2022. – Vol. 20(4). – Pp. 1939-1997. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1>.
13. Empirical seismic vulnerability assessment model of typical urban buildings / Si-Qi Li, Y. S. Chen, H. B. Liu, C. Del Gaudio // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2023. – Vol. 21(4). – Pp. 2217-2257. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01585-8>.
14. Zakian, P. Seismic design optimization of engineering structures: a comprehensive review / P. Zakian, A. Kaveh // *Acta Mechanica*. – 2023. – Vol. 234(4). – Pp. 1305-1330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03470>.
15. Mirfarhadi, S. A. On optimal proportions of structural member cross-sections to achieve best seismic performance using value based seismic design approach / S. A. Mirfarhadi, H. E. Estekanchi, M. Sarcheshmehpour // *Engineering Structures*. – 2021. – Vol. 231. – Article ID: 111751. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111751>.
16. Sajan, K. C. Progress in sustainable structural engineering: a review / K. C. Sajan, D. Gautam // *Innovative Infrastructure Solutions*. – 2021. – Vol. 6(2). DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00419-3>.
17. Askar, R. Adaptability of buildings: a critical review on the concept evolution / R. Askar, L. Bragança, H. Gervásio // *Applied Sciences*. – 2021. – Vol. 11(10). – Article ID: 4483. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11104483>.
18. Seismic and energy integrated retrofitting of existing buildings with an innovative ICF-based system: design principles and case studies / V. Pertile, A. Stella, L. De Stefani, R. Scotta // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13(16). – Article ID: 9363. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13169363>.

References

1. Allen, R. M., & Stogaitis, M. (2022). Global growth of earthquake early warning. *Science*, 375(6582), 717–718. <https://doi.org/10.1126/science.abl5435>.
2. Shaffril, H. A. M., Samah, A. A., & Kamarudin, S. (2021). Speaking of the devil: A systematic literature review on community preparedness for earthquakes. *Natural Hazards*, 108(3), 2393–2419. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04867-7>.
3. Shahjalal, M., Yahia, A. K. M., Morshed, A. S. M., & Tanha, N. I. (2024). Earthquake-resistant building design: Innovations and challenges. *Global Mainstream Journal of Innovation, Engineering & Emerging Technology*, 3(4), 101–119. <https://doi.org/10.62304/jieet.v3i04.209>.
4. Mohamud, A. A., Aitettaleb, F. E., Elabidine, S. Z., & Islam, M. R. U. (2024). Integrating modern technologies for earthquake-resistant buildings. *European Journal of Theoretical and Applied Sciences*, 2(6), 403–412. [https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2\(6\).34](https://doi.org/10.59324/ejtas.2024.2(6).34).
5. Glukhovskiy, V., Nemchynov, Yu., Mariienkov, M., & Babik, K. (2023). Seismostiike budivnytstvo v Ukraini: Stan eksperymentalno-teoretychnykh doslidzhen ta rozrobka normatyvnoi bazy [Seismic-resistant construction in Ukraine: State of experimental-theoretical research and development of regulatory framework]. *Nauka ta Budivnytstvo – Science and Construction*, 37(3), 42–51. <https://doi.org/10.33644/313-6679-3-2023-5>.
6. Yasnii, V. P., & Budz, V. I. (2023). Prystroi ta systemy zakhystu budivel ta sporud vid dii tsyklichnykh navantazhen: Suchasnyi stan ta perspektyvy [Devices and systems for protecting buildings and structures from cyclic loads: Current state and prospects]. *Problemy Obchysluvalnoi Mekhaniky i Mitsnosti Konstruktsii – Problems of Computational Mechanics and Structural Strength*, 1(36), 105-114. <https://doi.org/10.15421/4223109>.
7. Hetun, H., Koliakova, V., Solomin, A., & Bezkyubenko, I. (2022). Osoblyvosti proiektuvannia stalevykh seismostiikykh konstruktsii vysotnykh budivel [Design features of steel earthquake-resistant structures of high-rise buildings]. *Budivelni Konstruktsii. Teoriia i Praktyka – Building Structures. Theory and Practice*, 11, 18–31. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.11.2022.18-31>.

8. Havryliuk, O., Nechyporenko, D., & Zhuk, V. (2024). Napruzhenno-deformovanyi stan konstruktsii budynku z vrakhuvanniam mozhlivoi lokalnoi vidmovy elementu [Stress-strain state of building structures considering possible local element failure]. *Bases and Foundations*, 48, 100–115. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.48.2024.100-115>.
9. Malyskyi, D., & Furman, V. (2023). Kompiuterne modeliuвання teplovoho rezhymu heolohichnoho i heofizychnoho seredovysch [Computer modeling of the thermal regime of geological and geophysical environments]. *Elektronika ta Informatsiini Tekhnolohii – Electronics and Information Technologies*, 15, 48–58. <https://doi.org/10.30970/eli.15.5>.
10. Sebastiani, I., D'Amore, S., Pinotti, R., & Pampanin, S. (2024). Integrated rehabilitation of reinforced concrete buildings: Combining seismic retrofit by means of low-damage exoskeleton and energy refurbishment using multi-functional prefabricated facade. *Journal of Building Engineering*, 95, Article 110368. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110368>.
11. Zhang, J. L., Li, G., Yu, D. H., & Dong, Z. Q. (2024). Framework for seismic risk analysis of engineering structures considering the coupling damage from multienvironmental factors. *Journal of Structural Engineering*, 150(10), Article 04024147. <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-13340>.
12. Cattari, S., Calderoni, B., Calì, I., Camata, G., de Miranda, S., Magenes, G., & Saetta, A. (2022). Nonlinear modeling of the seismic response of masonry structures: Critical review and open issues towards engineering practice. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(4), 1939–1997. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01263-1>.
13. Li, S. Q., Chen, Y. S., Liu, H. B., & Del Gaudio, C. (2023). Empirical seismic vulnerability assessment model of typical urban buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(4), 2217–2257. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01585-8>.
14. Zakian, P., & Kaveh, A. (2023). Seismic design optimization of engineering structures: A comprehensive review. *Acta Mechanica*, 234(4), 1305–1330. <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03470>.
15. Mirfarhadi, S. A., Estekanchi, H. E., & Sarcheshmehpour, M. (2021). On optimal proportions of structural member cross-sections to achieve best seismic performance using value-based seismic design approach. *Engineering Structures*, 231, Article 111751. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111751>.
16. KC, S., & Gautam, D. (2021). Progress in sustainable structural engineering: A review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(2). <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00419-3>.
17. Askar, R., Bragança, L., & Gervásio, H. (2021). Adaptability of buildings: A critical review on the concept evolution. *Applied Sciences*, 11(10), Article 4483. <https://doi.org/10.3390/app11104483>.
18. Pertile, V., Stella, A., De Stefani, L., & Scotta, R. (2021). Seismic and energy integrated retrofitting of existing buildings with an innovative ICF-based system: Design principles and case studies. *Sustainability*, 13(16), Article 9363. <https://doi.org/10.3390/su13169363>.

Отримано 17.12.2024

UDC 624.042.4:550.34

Yurii Maksymiuk¹, Oleksandr Avdiichuk², Dmytro Lukianchuk³

¹Doctor of Science (Engineering), Associate Professor,
Professor at the KNUCA Department of Structural Mechanics, Faculty of Construction
Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

Email: maksymiuk.iuv@knuba.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5814-6227>

²Postgraduate at the KNUCA Department of Structural Mechanics, Faculty of Construction
Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

Email: avdiichuk_ov-2022@knuba.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-1035-2084>

³Postgraduate at the KNUCA Department of Structural Mechanics, Faculty of Construction
Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

Email: lukianchuk_dv-2022@knuba.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-1182-2472>

TECHNICAL ASPECTS OF ENSURING SEISMIC STABILITY OF MODERN STRUCTURES

The article examines an important area of civil engineering that is becoming increasingly significant in the context of growing urbanization and the increasing frequency of seismic events worldwide. As populations concentrate in earthquake-prone regions, ensuring the structural integrity of buildings and infrastructure becomes a primary task for architects, engineers, and urban planners. The relevance of this topic is determined by the devastating impact of earthquakes on human life, economic stability, and environmental integrity, making the development of reliable methods and technologies to improve seismic resilience essential.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

The aim of the research is to explore and analyze advanced engineering solutions, in particular innovative materials, structural systems and seismic isolation technologies, to improve the seismic stability of modern structures while addressing practical implementation challenges.

The article presents a comprehensive analysis of current technical solutions used in the design and construction of earthquake-resistant structures. It discusses advancements in materials science, innovative architectural designs, and the integration of modern engineering technologies such as base isolation, energy dissipation systems, and reinforced concrete technologies. The role of computer programs and modeling in predicting seismic responses and optimizing structural performance under dynamic loads is also highlighted. The results show that the use of these modern methods significantly enhances the ability of structures to withstand seismic forces, thereby reducing the potential for catastrophic failure.

Thus, the study emphasizes the necessity for continuous innovation and adaptation in seismic design practices. The article underscores the need for a multidisciplinary approach that incorporates knowledge from geotechnical engineering, materials science, and architecture to create resilient urban environments. Furthermore, it advocates for updating building codes and regulations to reflect the latest research findings and technological advancements. The article confirms that, despite significant progress in ensuring the seismic stability of modern structures, ongoing research and collaborative efforts are crucial for addressing the evolving challenges posed by earthquakes.

Keywords: modern structures; engineering solutions; materials; earthquake-resistant technologies; modeling.

Table: 4. **References:** 18.

Оксана Юрївна Бердник¹, Сергій Володимирович Виговський²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)
E-mail: kseniareznik87@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5321-3518>

²операційний директор ТОВ «Гранд Бетон»
Київський національний університет будівництва і архітектури (Київ, Україна)
E-mail: production.dep@grandbeton.com.ua

ВИКОРИСТАННЯ ТОНКОДИСПЕРСНОГО СКЛОПОРОШКУ ЯК ЧАСТКОВА ЗАМІНА ЦЕМЕНТУ ТА ВПЛИВ ЙОГО НА МІЦНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНУ

Бетон є найпоширенішим будівельним матеріалом, який виробляється комерційно, і його популярність стрімко зростає з кожним днем [1–3]. Основні складові, що використовуються у виробництві бетону – це цемент, крупний та дрібний заповнювач, вода, добавки [4–6]. Ці матеріали є необхідними для будівельної галузі [7–10]. Для покращення різних характеристик бетонної суміші застосовують активно-мінеральні добавки (АМД), такі як гранульований доменний шлак, зола-виносу, кремнезем тощо.

Кількість скляних відходів, що утворюються, поступово зростає в останні роки. Більшість скляних відходів має обмежений термін служби і викидається на полігони, але воно повинно бути повторно використане для зменшення екологічних проблем, оскільки не є біорозкладним [11–13]. Переробка та зменшення кількості відходів є ключовими частинами системи управління відходами, оскільки вони сприяють збереженню природних ресурсів, зменшенню потреби в площах для сміттєвих полігонів і зниженню забруднення води та повітря [14].

Наразі ведеться багато досліджень, спрямованих на модифікацію та покращення властивостей бетону шляхом додавання різних типів матеріалів, а саме порошку скляного бою, оскільки він виявляє пуцоланову активність і може застосовуватися як АМД. Ця стаття представляє оптимальне використання відходів скла в бетонній суміші, що сприяє підвищенню якості бетонної суміші.

У роботі використано скляний порошок з розміром частинок менше 100 мікрон. Робота була поділена на відсоткові концентрації, що варіювалися від 0 до 15 %.

Було проведено серію тестів для вивчення впливу скляного порошку на міцність бетону.

Ключові слова: цемент; склопорошок; бетон; часткова заміна; міцність на стиск.

Рис.: 2. Табл.: 3. Бібл.: 21.

Актуальність теми дослідження. У зв'язку зі збільшенням кількості відходів скла за останні роки, яке не є біорозкладним, існує потреба в грамотній утилізації даного виду відходів. Також при виробництві цементу відбувається великий викид в повітря CO₂, що шкодить навколишньому середовищу, а зменшення кількості використовуваного цементу зможе покращити екологічну проблему.

Постановка проблеми. Потреба в утилізації скляних відходів і використання їх для покращення характеристик бетонної суміші, а також як часткова заміна цементу. Потреба в покращенні екології та в зменшенні викидів CO₂.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різні унікальні властивості природного скла, такі як силікатна природа, не гігроскопічність, висока твердість, стійкість до корозії та тепла, спонукали багатьох дослідників використовувати скло в бетонних сумішах і вивчати його вплив на властивості бетону [11–13].

Досліджено вплив скляного порошку, який замінював бездобавочний цемент у бетоні, та перевіряли міцність на стиск кубів розміром 150×150×150 мм на різних етапах твердіння. Вони також зазначили, що тонкодисперсний скляний порошок не спричиняє реакції лугів із кремнеземом (ASR) і забезпечує більшу міцність, ніж великі частинки скла [15].

Досліджено ефективність скляного порошку, який використовували для заміщення цементу в різних пропорціях – 5, 10 і 15 % від маси цементу. Зразки-куби з такого бетону були заформовані для перевірки міцності на стиск і порівняні з бетоном, з бездобавочним цементом. Міцність на стиск була вищою при 5 % заміщенні скляного порошку і перевищувала міцність контрольного зразку. Однак при подальшому збільшенні вмісту скляного порошку міцність почала зменшуватися, що пояснюється високим вмістом магnezії в склі, використаному в цьому дослідженні. Вміст магnezії у склі становив 4,18 %, тоді як допустима межа для цементу — від 1 до 3 % [16].

Також проводилися дослідження про вплив частинок різного розміру скляного порошку на міцнісні характеристики цементних зразків. У цьому дослідженні цемент замінювали частинками розміром 150 мікронів і 300 мікронів, відповідно, у пропорціях 10, 20, 30 і 40%, і порівнювали отримані результати зі звичайними зразками без заміщення (0 %). Міцність на стиск підвищувалася при розмірі частинок менш ніж 150 мікронів до 30 % заміщення, а потім знижувалася. Однак для частинок розміром 300 мікронів міцність зменшувалася при кожному рівні заміщення [17].

Ці дослідження показують, що оптимальний розмір частинок скляного порошку та його концентрація мають важливий вплив на міцність затверділого бетону, особливо в аспекті хімічних взаємодій та магнезіальних домішок.

Вивчався вплив склопорошку на властивості бетону. Для перевірки міцності скляний порошок замінювали цементом у кількостях 5, 10, 15, 20 і 25 % за вагою. Міцність перевіряли на різних етапах твердіння бетону. Міцність на стиск показує покращення внаслідок постійного збільшення відходів скляного порошку. Міцність зростає до 15 % заміщення, а потім починає зменшуватися, що пов'язано з алкалійно-силікатною реакцією, яка виникає під час гідратації цементу. Зростання міцності до 15 % відбувається внаслідок пуцоланової реакції та заповнення пустот скляним порошком, що призводить до утворення щільної мікроструктури бетону [18].

Були проведені досліди, які показали характеристику бетону з використанням відходів скла як заміну цементу в різних відсотках. Також 15 % скляного порошку використовувалося як добавка для перевірки водонепроникності. Міцність починає зменшуватися з підвищенням заміщення скляного порошку понад 15 % на 7-й день. Проте на 28-й і 91-й дні міцність зростає до 30 %, а потім зменшується на невелику величину, але не менше, ніж у звичайному бетоні без заміщення скляним порошком. Коли заміщення скляного порошку перевищує 30 %, у подальшому віці збільшення міцності не спостерігається [19].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Не розглянуте використання склопорошку як часткової заміни цементу ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 та ПЦ ІІ/А-ІІІ-400 в бетонній суміші (попередні дослідження проводилися на ПЦ І-500).

Мета статті - часткова заміна ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 та ПЦ ІІ/А-ІІІ-400 склопорошком та вплив його на міцнісні характеристики бетону.

Виклад основного матеріалу. Для проведення дослідження були використані такі сировинні матеріали:

- ПЦ ІІ/А-ІІІ-500, який відповідає стандарту ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови.

Таблиця 1 – Мінералогічний склад ПЦ ІІ/А-ІІІ-500 (XRD аналіз, X-ray diffractometer AERIS Cement, Malvern Panalytical), %

Names of materials	
C ₃ S Alite	44,82
C ₂ S Belite	16,02
C ₄ AF Ferite	7,54
C ₃ A Aluminate	2,26
C ₃ A ortho	1,84
FreeLime-CaO	0,34
Portlantide	3,22
Periclase MgO	0,72
Arcanite-K ₂ SO ₄	0,00
Aphthalite-K ₃ Na(SO ₄) ₂	0,00
Calciolangbeinite K ₂ Ca ₂ (SO ₄) ₃	0,05
Gypsum-CaSO ₄ * ₂ H ₂ O	5,22
Hemihydrate CaSO ₄ *0,5H ₂ O	0,24
Anhydrite CaSO ₄	0,10
Calcite-CaCO ₃	1,04
Quartz-SiO ₂	0,02
Slag	16,58

- ПЦ ІІ/А-ІІІ-400, який відповідає стандарту ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови.

Таблиця 2 – Мінералогічний склад ПЦ II/A-III-400, (XRD аналіз, X-ray diffractometer AERIS Cement, Malvern Panalytical), %

Names of materials	ПЦ II/A-III-500
C ₃ S Alite	48,08
C ₂ S Belite	13,90
C ₄ AF Ferrite	7,64
C ₃ A Aluminate	1,92
C ₃ A ortho	1,73
FreeLime-CaO	0,47
Portlantide	1,37
Periclase MgO	1,02
Arcanite-K ₂ SO ₄	0,00
Aphthalite-K ₃ Na(SO ₄) ₂	0,00
Calciojangbeinite K ₂ Ca ₂ (SO ₄) ₃	0,00
Gypsum-CaSO ₄ *2H ₂ O	2,50
Hemihydrate CaSO ₄ *0.5H ₂ O	0,68
Anhydrite CaSO ₄	0,11
Calcite-CaCO ₃	1,13
Quartz-SiO ₂	0,03
Slag	19,44

- Порошок скляного бою

Таблиця 3 – Хімічний склад склопорошку

Назва оксидів	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	Інші
Склопорошок	68,73	1,05	0,08	2,81	9,13	17,05	1,15

- Пісок річковий
- Щебінь гранітний
- Вода

Дослідження міцності на стиск бетону С25/30 проводилися в лабораторії заводу ТОВ «Гранд Бетон» згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 на зразках кубах 100x100x100 мм на 3, 7, 28 добу на складах з вмістом склопорошку 0%, 5%, 10%, 15% з пропорційною заміною ПЦ II/A-III-500 та ПЦ II/A-III-400 відповідно.

За результатами випробувань було експериментально встановлено підвищення міцнісних характеристик затверділого бетону. Так зразки, на 3 добу показали підвищення міцності на стиск від контрольного зразка на ПЦ II/A-III-500 в середньому на 6,5 %. На 7 добу спостерігається уповільнення набору міцності. А на 28 добу помічений стрімкий зріст міцності в середньому на 8,2 %. Найкращі результати показав зразок з 10 % вмістом склопорошку і його міцність склала 49,25 МПа на 28 добу. Дані досліджень показані на рис. 1.

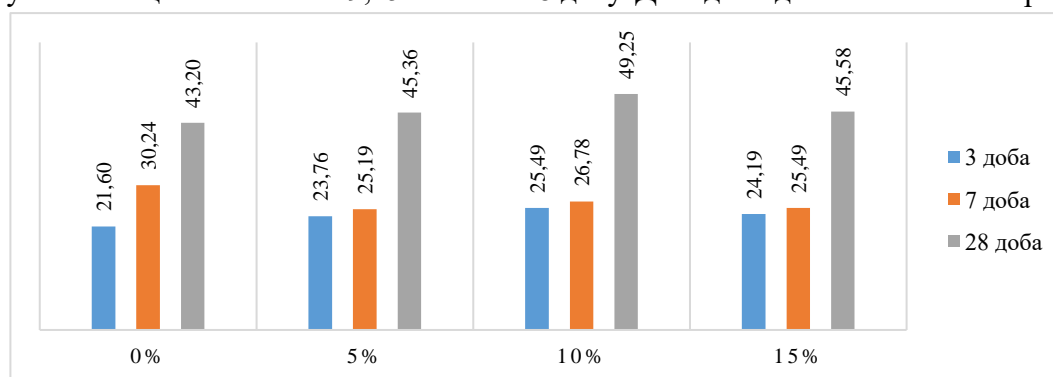


Рис. 1. Міцність на стиск зразків кубів на основі ПЦ II/A-III-500 із заміщенням цементу на 0, 5, 10, 15 % склопорошком на 3, 7 та 28 добу відповідно, у МПа

За результатами випробувань було експериментально встановлено підвищення міцнісних характеристик затверділого бетону. Так зразки, на 3 добу показали підвищення міцності на стиск від контрольного зразка на ПЦ II/A-III-400 в середньому на 11,7%. На 7 добу в середньому відповідають значенням контрольного зразка. А на 28 добу помічений стрімкий зріст міцності в середньому на 12 %. Найкращі результати показав зразок з 10 % вмістом склопорошку і його міцність склала 46,25 МПа на 28 добу. Дані досліджень показані на рис. 2.

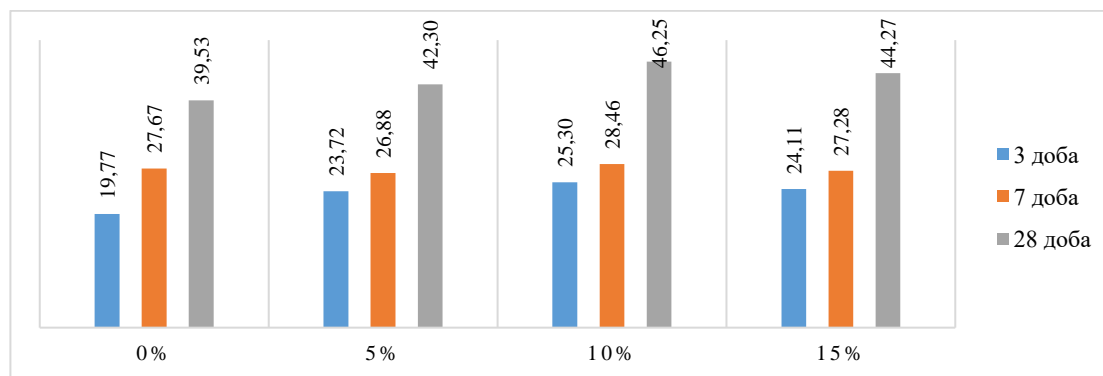


Рис. 2. Міцність на стиск зразків кубів на основі ПЦ II/A-III-400 з заміщенням цементу на 0%, 5%, 10%, 15% склопорошком на 3, 7 та 28 добу відповідно, в МПа

Висновки. За результатами досліджень було доведено доцільність використання склопорошку як заміщення цементів типу ПЦ II/A-III-500 та ПЦ II/A-III-400, що не вплинуло на міцнісні характеристики, а навпаки покращило їх. Найкращі зразки були із заміщенням цементу склопорошком у розмірі 10 %.

Це дає підґрунтя для розвитку подальших досліджень і показує доцільність використання склопорошку, як часткову заміну цементу в бетонах на основі шлаковмісних цементів.

Список використаних джерел

1. Ahmed, S. N. Thermal conductivity and hardened behavior of eco-friendly concrete incorporating waste polypropylene as fine aggregate / S. N. Ahmed, N. Hamah Sor, M. A. Ahmed, S. M. A. Qaidi // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 57, № 2. – Pp. 818–823. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.417>.
2. Al-Tayeb, M. M. Experimental and simulation study on the impact resistance of concrete to replace high amounts of fine aggregate with plastic waste / M. M. Al-Tayeb, Y. I. A. Aisheh, S. M. A. Qaidi, B. A. Tayeh // *Case Studies in Construction Materials*. – 2022. – Vol. 17. – e01324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01324>.
3. Almeshal, I. Mechanical properties of eco-friendly cements-based glass powder in aggressive medium / I. Almeshal, M. M. Al-Tayeb, S. M. A. Qaidi, B. H. Abu Bakar, B. A. Tayeh, // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – № 58. – P. 1582–1587. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.613>.
4. Cao, M. Effectiveness of multiscale hybrid fiber reinforced cementitious composites under single degree of freedom hydraulic shaking table / M. Cao, M. Khan // *Structural Concrete*. – 2021. – № 22(1). – Pp. 535-549. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201900228>.
5. Cao, M. Effectiveness of calcium carbonate whisker in cementitious composites / M. Cao, M. Khan, S. Ahmed // *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*. – 2020. – № 64(1). – P. 265. DOI: <https://doi.org/10.3311/PPci.14288>.
6. ASTM International Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens1 // ASTM International. – 2017.
7. de Castro, S. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates / S. de Castro, J. de Brito // *Journal of Cleaner Production*. – 2013. – № 41. – Pp. 7-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.021>.
8. Serpa, D. Concrete made with recycled glass aggregates: Mechanical performance / D. Serpa, J. de Brito, J. Pontes // *ACI Materials Journal*. – 2015. – № 112(1). DOI: <https://doi.org/10.14359/51687366>.
9. Faraj, R. H. Performance of self-compacting mortars modified with nanoparticles: A systematic review and modeling / R. H. Faraj, H. U. Ahmed, S. Rafiq, N. H. Sor, D. F. Ibrahim, [et al.] // *Cleaner Materials*. – 2022. – № 4. – 100086. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100086>.
10. Khan, M. Improvement in concrete behavior with fly ash, silica-fume and coconut fibres / M. Khan, M. Ali // *Construction and Building Materials*. – 2019. – № 203. – Pp. 174-187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.103>.

11. Khan, M. Efficiency of silica-fume content in plain and natural fiber reinforced concrete for concrete road / M. Khan, A. Rehman, M. Ali // *Construction and Building Materials*. – 2020. – № 244. – 118382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118382>.
12. Kou, S. C. Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate / S. C. Kou, C. S. Poon // *Cement and Concrete Composites*. – 2009. – № 31(2). – Pp. 107-113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.00>.
13. Lam, C. S. Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass-ASR consideration / C. S. Lam, C. S. Poon, D. Chan // *Cement and Concrete Composites*. – 2007. – № 29(8). – Pp. 616-625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.008>.
14. Lee, G. Effects of recycled fine glass aggregates on the properties of dry-mixed concrete blocks / G. Lee, C. S. Poon, Y. L. Wong, T. C. Ling // *Construction and Building Materials*. – 2013. – № 38. – Pp. 638–643. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.017>.
15. Shayan, A. Value-Added Utilization of Waste Glass in Concrete / A. Shayan, A. Xu // *Cement and Concrete Research*. – 2004. – № 34. – Pp. 81-89.
16. Bajad, M. N. Experimental Investigations in Developing Concrete Containing Waste Glass Powder as Pozzolana / M. N. Bajad, C. D. Modhera // *Journal of Information, Knowledge and Research In Civil Engineering*. – 2010. – № 1(1). – Pp. 32-37.
17. Bajad, M. N. Effect of glass on strength of concrete subjected to sulphate attack / M. N. Bajad, C. D. Modhera, A. K. Desai // *International Journal of Civil Engineering Research and Development*. – 2011. – № 1(2). – Pp. 1-13.
18. Topçu, I. B. Properties of concrete containing waste glass / I. B. Topçu, M. Canbaz // *Cement and Concrete Research*. – 2014. – Vol. 34. – Pp. 267-274.
19. Carpenter, A. J. Mitigation of ASR in pavement patch concrete that incorporates highly reactive fine aggregate / A. J. Carpenter, C. M. Cramer // *Transportation Research Record*. – 1668. – № 99-1087. – Pp. 60-67.
20. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://bud-kiev.com.ua/wp-content/uploads/2019/02/27-46-2010.pdf>.
21. ДСТУ Б В.2.7-226:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Ультразвуковий метод визначення міцності. – Чинний від 2009-12-22. – Вид. офіц. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2010.

References

1. Ahmed, S. N., Hamah Sor, N., Ahmed, M. A., Qaidi, S. M. A. (2022). Thermal conductivity and hardened behavior of eco-friendly concrete incorporating waste polypropylene as fine aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 57, 818–823. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.417>.
2. Al-Tayeb, M. M., Aisheh, Y. I. A., Qaidi, S. M. A., Tayeh, B. A. (2022). Experimental and simulation study on the impact resistance of concrete to replace high amounts of fine aggregate with plastic waste. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01324. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01324>.
3. Almeshal, I., Al-Tayeb, M. M., Qaidi, S. M. A., Abu Bakar, B. H., Tayeh, B. A. (2022). Mechanical properties of eco-friendly cements-based glass powder in aggressive medium. *Materials Today: Proceedings*, 58, 1582–1587. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.613>.
4. Cao, M., Khan, M. (2021). Effectiveness of multiscale hybrid fiber reinforced cementitious composites under single degree of freedom hydraulic shaking table. *Structural Concrete*, 22(1), 535–549. <https://doi.org/10.1002/suco.201900228>.
5. Cao, M., Khan, M., Ahmed, S. (2020). Effectiveness of calcium carbonate whisker in cementitious composites. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 64(1), 265. <https://doi.org/10.3311/PPci.14288>.
6. ASTM International Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates (2017). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens1. *ASTM International*.
7. de Castro, S., de Brito, J. (2013). Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 41, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.021>.
8. Serpa, D., de Brito, J., Pontes, J. (2015). Concrete made with recycled glass aggregates: Mechanical performance. *ACI Materials Journal*, 112(1). <https://doi.org/10.14359/51687366>.
9. Faraj, R. H., Ahmed, H. U., Rafiq, S., Sor, N. H., Ibrahim, D. F. et al. (2022). Performance of self-compacting mortars modified with nanoparticles: A systematic review and modeling. *Cleaner Materials*, 4, 100086. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100086>.

10. Khan, M., Ali, M. (2019). Improvement in concrete behavior with fly ash, silica-fume and coconut fibres. *Construction and Building Materials*, 203, 174–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.103>.
11. Khan, M., Rehman, A., Ali, M. (2020). Efficiency of silica-fume content in plain and natural fiber reinforced concrete for concrete road. *Construction and Building Materials*, 244, 118382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118382>.
12. Kou, S. C., Poon, C. S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 31(2), 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.00>.
13. Lam, C. S., Poon, C. S., Chan, D. (2007). Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass–ASR consideration. *Cement and Concrete Composites*, 29(8), 616–625. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.008>.
14. Lee, G., Poon, C. S., Wong, Y. L., Ling, T. C. (2013). Effects of recycled fine glass aggregates on the properties of dry-mixed concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 38, 638–643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.017>.
15. A. Shayan and A. Xu, (2004.) Value added utilization of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34, 81-89.
16. Bajad, M. N. and Modhera, C.D. (2010). Experimental Investigations in Developing Concrete Containing Waste Glass Powder as Pozzolana. *Journal of Information, Knowledge and Research In Civil Engineering*, 1(1), 32-37.
17. Bajad, M. N., Modhera, C.D. and Desai, A. K. (2011). Effect of glass on strength of concrete subjected to sulphate attack. *International Journal of Civil Engineering Research and Development*, 1(2), 1-13.
18. Topcu, B., Canbaz, M. (2014). Properties of Concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*, 34, 267-274.
19. Carpenter, A. J., Cramer, C.M. (1999). Mitigation of ASR in pavement patch concrete that incorporates highly reactive fine aggregate. *Transportation Research Record 1668*, (99-1087), 60-67.
20. *Budivělňny materialy. Cementy zagal'nogobydivel'nogo pryznachenya. Technichy umovy [Construction materials. Cements for general construction purposes. Technical specifications]*. (2011). DSTU B.V. 2.7-46:2010 from September 1, 2011. Minenerhobud Ukrainy.
21. *Budivělňny materialy. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za controlnimy zrazkamy [Construction materials. Concretes. Methods for determination of strength by control samples]*. (2010). DSTU B.V. 2.7-214:2009 from December 22, 2009. Minenerhobud Ukrainy.

Отримано 01.11.2024

UDC 666.972

Oksana Berdnyk¹, Serhii Vyhovskyi²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Scientific Research Institute for Binders and Materials
Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

E-mail: kсениарезник87@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5321-3518>

Scopus Author ID: [57214230362](https://orcid.org/57214230362)

²operations director of "Grand Beton" LLC

Kyiv National University of Construction and Architecture (Kyiv, Ukraine)

E-mail: production.dep@grandbeton.com.ua

USE OF FINE GLASS POWDER AS A PARTIAL CEMENT SUBSTITUTE AND ITS EFFECT ON CONCRETE STRENGTH CHARACTERISTICS

Concrete is the most commonly used commercially produced building material and its popularity is increasing rapidly daily [1–3]. The main components used in the production of concrete are cement, coarse and fine aggregates, water and additives [4–6]. These materials are essential for the construction industry [7–10]. Active mineral additives (AMAs), such as ground granulated blast furnace slag, fly ash, silica fume, etc., are used to improve various properties of concrete mixes.

The amount of glass waste generated has gradually increased in recent years. Most glass waste has a limited lifespan and ends up in landfills, but it should be reused to reduce environmental problems as it is non-biodegradable [11–13]. Recycling and waste reduction are critical aspects of waste management systems, as they help preserve natural resources, reduce landfill space requirements, and reduce water and air pollution [14].

Extensive research is currently being carried out to modify and improve the properties of concrete by adding various types of materials, in particular glass powder, due to its pozzolanic activity and suitability as an AMA.

This paper presents the optimal use of waste glass in concrete mixes to improve concrete quality. Glass powder with a particle size of less than 100 microns was used in this study. The study included different percentage concentrations ranging from 0 to 15 %. A series of tests were carried out to investigate the effect of glass powder on concrete strength.

Keywords: cement, glass powder, concrete, partial replacement, compressive strength.

Fig.: 2. Table: 3. References: 21.

**Олена Леонтіївна Герасимчук¹, Василь Васильович Гой²,
Владислав Вікторович Харів³**

¹кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри наук про Землю
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: kgt_gol@ztu.edu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1279-1888>

²кандидат економічних наук, докторант
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова (Харків, Україна)
E-mail: vasssgoi@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1822-4478>

³аспірант
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова (Харків, Україна)
E-mail: v.khariv@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-7937-5324>

**ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ОЦІНКИ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ
У ВІДДАЛЕНИХ РАЙОНАХ**

У статті досліджено сучасні геодезичні технології, які використовуються для проведення оцінки земельних ресурсів у віддалених та важкодоступних районах, зокрема глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), безпілотні літальні апарати (БПЛА), лідарні технології та методи гібридного позиціонування. Оцінено потенціал застосування GNSS для точного координування та визначення меж земельних ділянок незалежно від погодних умов або доступності території. Розроблено підходи до використання БПЛА для виконання аерофотознімання з високою роздільною здатністю, що дозволяє оперативно отримувати дані про стан земельних ресурсів та об'єктів. Обґрунтовано переваги застосування лідарних технологій для створення тривимірних моделей рельєфу, особливо у складних умовах, таких як густі ліси або гірські райони. Запропоновано методи гібридного позиціонування, які поєднують GNSS з інерційними навігаційними системами (INS), що гарантує безперервний збір даних навіть за відсутності супутникового сигналу. Досліджено етапи обробки геодезичних даних, включно з фільтрацією, геоприв'язкою, системним аналізом і цифровою візуалізацією, які забезпечують високу якість кінцевих результатів. Обґрунтовано необхідність інтеграції даних із різних джерел для створення комплексних ГІС, що дозволяє враховувати широкий спектр параметрів при оцінці стану земель.

Ключові слова: геодезичні технології; земельні ресурси; землеустрій; геодезичний пошук; геодані; земельний моніторинг; цифрова візуалізація.

Рис.: 4. Табл.: 2. Бібл.: 14.

Актуальність дослідження. Технології та заходи оцінювання стану земельних ресурсів є ключовим елементом у процесах планування, управління та використання земельних ділянок, особливо у віддалених районах, де природні умови, відсутність інфраструктури та недостатнє фінансування часто ускладнюють проведення традиційних геодезичних робіт. В умовах глобальних кліматичних змін, швидкого розвитку самих геодезичних технологій і зростаючих потреб у раціональному використанні земель, формується потреба імплементації нових геодезичних методів оцінювання, які можуть забезпечити високий рівень точності, ефективності й доступності для найвіддаленіших регіональних утворень та їх земельних фондів.

Постановка проблеми. Провідні та найбільш сучасні геодезичні технології, такі як глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), безпілотні літальні апарати (БПЛА), лідарні технології та геоінформаційні системи (ГІС), надають поштовху для моніторингу та проведення геодезичної оцінки стану і якості земельних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Згідно з дослідженнями В. Чабанюк, К. Поливач [1], використання GNSS забезпечує високу точність визначення координат у будь-якому місці земної кулі, що робить цей метод незамінним для оцінки земельних ресурсів у віддалених районах.

Зокрема, дослідження К. Фей, К. Рехбергер, К. Войт [2] показали, що GNSS має певні переваги в порівнянні з традиційними методами геодезії, такими як тахеометрія, оскільки дозволяє знизити витрати на проведення робіт та зменшити час, необхідний для збору даних. Згідно з результатами Дж. Вільянуева, А. Бланко [3], використання БПЛА

для геодезичного знімання дозволяє значно скоротити витрати на польові роботи, а також мінімізувати ризики для геодезистів у небезпечних або важкодоступних умовах. Водночас В. Македон, О. Байлова [4] відзначають, що БПЛА обладнані фотокамерами, інфрачервоними сенсорами та лідарними системами, що дозволяє збирати широкий спектр даних, необхідних для оцінки земельних ресурсів. Дослідження П. Міхно, І. Лісовенко, Д. Бушуєв, І. Риженко [5] підтверджують, що лідарні системи є надзвичайно ефективними у складних географічних умовах, таких як густі ліси, гористі райони або території з неоднорідним рельєфом.

Використання сучасних геодезичних технологій відіграє ключову роль у проведенні оцінки земельних ресурсів, особливо у віддалених районах. Наприклад, як зазначають В. Гой, В. Харів, І. Бурвіков [6], застосування дистанційного зондування і геодезичних методів дозволяє отримувати точні дані про стан земельної власності, оцінювати її перспективи та вирішувати проблеми землекористування. Іншим прикладом є використання геодезичного й дистанційного моніторингу земель для спеціалізованих цілей, таких як сонячні електростанції. Цей підхід забезпечує високий рівень точності даних, необхідний для ефективного управління земельними ресурсами [7]. Також важливим напрямом є моніторинг використання земель у сучасних умовах, що дозволяє оптимізувати їх розподіл та планування, що підтверджено в роботі М. Лапшій, О. Гулько [8]. Як вказує М. Пілічева [9], то застосування сучасних технологій землеустрою і кадастру відкриває нові можливості для автоматизації процесів оцінювання земель. Використання ГІС-технологій значно спрощує управління земельними ресурсами, забезпечуючи візуалізацію даних та інтеграцію інформації з різних джерел [10], а дослідники Р. П. Федоренко, О. В. Кравченко [11] зазначають про те, що впровадження таких рішень є перспективним для ефективного оцінювання земельних ресурсів в Україні.

Таким чином, надане обґрунтування та огляд наукових публікацій свідчить про високий рівень актуальності поточного дослідження, що повністю зумовлено складовими, спрямованими на удосконалення методів оцінювання земельних ресурсів для віддалених районів з урахуванням новітніх технологічних розробок у сфері геодезичних пошуків.

Мета і задачі дослідження. Метою є проведення комплексного дослідження ефективності й доцільності використання провідних геодезичних технологій для оцінки якісних параметрів земельних ресурсів віддалених районів і територій.

Завдання дослідження:

- проаналізувати рівень розвитку геодезичних технологій, що можуть потенційно використовуватись для оцінювання якості земельних ресурсів;
- оцінити рівень ефективності поєднання геодезичних технологій у сфері віддаленого землекористування для забезпечення точності та надійності їх оцінювання;
- сформулювати пропозиції щодо впровадження і використання цифрових геодезичних технологій, направлених на скорочення технологічних операцій та підвищення точності результатів оцінювання.

Виклад основного матеріалу. Для оцінки земельних ресурсів у віддалених районах сучасні геодезичні технології дозволяють створювати деталізовані карти, які відображають макроструктуру агроландшафтів, їх геометричні параметри та просторове розташування. У випадках необхідності проводиться уточнення внутрішньої структури цих агроландшафтів на основі інформації, отриманої від сільськогосподарських підприємств і офіційних реєстрів. Визначається кількість агроландшафтів, які мають повний або частковий захист лісовими насадженнями, а також тих, що залишаються незахищеними, після чого обчислюються їхні площі та розміри.

Детальний аналіз рельєфу територій, розташованих поблизу досліджуваних агроландшафтів, базується на геостатистичних характеристиках, які фіксуються в табличній формі. Завдяки поєднанню даних про агроландшафти, рельєф і ґрунтові карти створюються моделі, що допомагають розподіляти поля відповідно до їх потенційної продуктивності. Використання аерокосмічного моніторингу аграрних угідь забезпечує виконання комплексу заходів, зокрема:

1. Виконання супутникового знімання аграрних територій із застосуванням знімків високої та надвисокої роздільної здатності в оптимальні періоди, такі як рання весна або літо.
2. Побудова космічних карт досліджуваної місцевості за допомогою електронних геодезичних приладів і програмного забезпечення QGIS.
3. Виділення макроструктури агроландшафтів у ГІС-середовищі на основі космічних знімків та відповідних баз даних.
4. Формування векторної карти, яка відображає розташування аграрних угідь, включно із захищеними та незахищеними лісовими насадженнями агроландшафтами.
5. Обчислення площі і розмірів земельних ділянок за допомогою ГІС-інструментів, що забезпечує точність просторового аналізу.

Створені тематичні бази даних містять всі доступні характеристики кожного поля, які реєструються та доповнюються векторними шарами, що демонструють ґрунтові контури й потенційну продуктивність угідь. Інтеграція цих даних дозволяє проводити детальний аналіз стану агроландшафтів, оцінювати рівень їхньої деградації, а також загальний екологічний стан території, що є основою для прийняття стратегічних рішень у сфері управління земельними ресурсами.

Реалії нашого часу засвідчують те, що земельні ресурси мають більш ніж провідну роль у розвитку економіки, забезпеченні продовольчої безпеки та збереженні природного середовища країни. Оцінювання земельних ресурсів у віддалених районах – це процес визначення характеристик, стану та вартості земельних ділянок, розташованих у територіях з обмеженим доступом, складним рельєфом або недостатньо розвинутою інфраструктурою. Сама оцінка включає в себе збір, обробку та аналіз геодезичних, екологічних, економічних і правових даних з метою формування комплексного уявлення про якість та придатність земельних ресурсів для їх подальшого використання, охорони або розвитку. Основна мета оцінювання земельних ресурсів у віддалених районах полягає у наданні точної та актуальної інформації про землі, що дозволяє ефективно планувати землекористування, визначати потенційні ризики та можливості для сільськогосподарського, промислового або рекреаційного використання.

Геодезичні технології мають ключове значення в аспекті точного й ефективного моніторингу та проведення методичного оцінювання виділених територіально земельних ресурсів, особливо для віддалених та важкодоступних територій. Традиційні та сталі методи геодезичного пошуку, що ґрунтуються на традиційних підходах вимірювання та використання обмежених інструментів, сьогодні вже значно поступаються за рівнем точності, швидкості й масштабності цифровим технологічним рішенням. Так, треба зауважити, що такі технології, як глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), безпілотні літальні апарати (БПЛА) та лідарні технології утворюють нове поле досліджень і формують сучасну практику у сфері сталого землевпорядкування, управління земельними ресурсами та просторового планування тощо [12].

1. Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), шляхи та складові їх застосування. Так сьогодні GNSS вже здатні забезпечити максимально точне позиціонування та координування в будь-якому місці земної кулі, незалежно від умов місцевості чи погодних умов. Технічні рішення по GNSS містять ряд поширених систем і програмних рішень, найвідомішими з яких є: GPS (США), Galileo (ЄС) та BeiDou (Китай). Відмічені

системи стабільно надають цільові можливості для отримання геофізичних даних про просторове розташування з точністю до декількох сантиметрів, що стало принциповою вимогою для здійснення геодезичних досліджень (рис. 1) [12].

Технічні рішення GNSS утворюють можливості по ефективному використанню спектра завдань, що щільно пов'язані з оцінкою стану земельних ресурсів, таких як: кадастрове знімання, моніторинг змін земного покриття, визначення меж земельних ділянок та виділення факторів прикладного землекористування.



Рис. 1. Цифрова візуалізація міської забудови та частини віддалених районів, отримане за допомогою GNSS

Джерело: [13].

2. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) та їх використання для проведення геодезичного знімання. Безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, вже мають широке поле використання в прикладній геодезії, і це відбулося завдяки відповідним унікальним можливостям для збирання даних на великих площах землі та у важкодоступних місцевостях і територіях [3]. Імплементация технології БПЛА надає доступ до виконання цифрового аерофотознімання з високою роздільною здатністю, що здатне забезпечити найбільш точну візуалізацію поверхні земельних ділянок та розташованих на них об'єктів (рис. 2.).



Рис. 2. Приклад цифрового матеріалу стану земельних ресурсів отриманого за допомогою БПЛА

Джерело: [14].

Технології БПЛА системно обладнані різноманітними датчиками, такими як фотокамери, інфрачервоні сенсори та лідари. Цей набір технічних інструментів, дає можливості для збору великих обсягів різноманітних даних поверхні землі у дійсно короткі терміни та цей факт є принциповим стосовно віддалених районів і земельних ділянок, коли швидкий і точний збір даних є критично швидким і необхідним. Використання засобів БПЛА надає можливості зменшення рівня витрат на окремі або групові геодезичні роботи та утворює базу для мінімізації всіх ризиків для геодезистів, які працюють у складних або небезпечних умовах [15]. Крім того, завдяки можливостям регулярного та частого моніторингу земельних ресурсів і планів, самі БПЛА здатні швидко сприяти забезпеченню більш оперативного реагування на зміни в землекористуванні.

3. Лідарні технології та їх ефективність у складних географічних умовах. Лідар (Light Detection and Ranging) – технологія дистанційного зондування, яка використовує лазерне випромінювання для вимірювання відстаней до об'єктів. Лідарні системи сьогодні встановлюють на літаках, на БПЛА або на наземні транспортні засоби. Лідарні системи забезпечують формування і цифровий контент високоточних тривимірних моделей поверхні землі, що є проривом в питанні оцінки корисності земельних ділянок і ресурсів. Ефективність лідарних технологій особливо проявляється у складних географічних умовах, таких як густі ліси, гористі райони або території з неоднорідним рельєфом і, крім того, лідарні системи забезпечують процеси проникнення крізь листяний покрив та дають точні цифрові карти виділеної (досліджуваної) поверхні землі, що було б неможливим для традиційних методів фотограмметрії (рис. 3) [16].

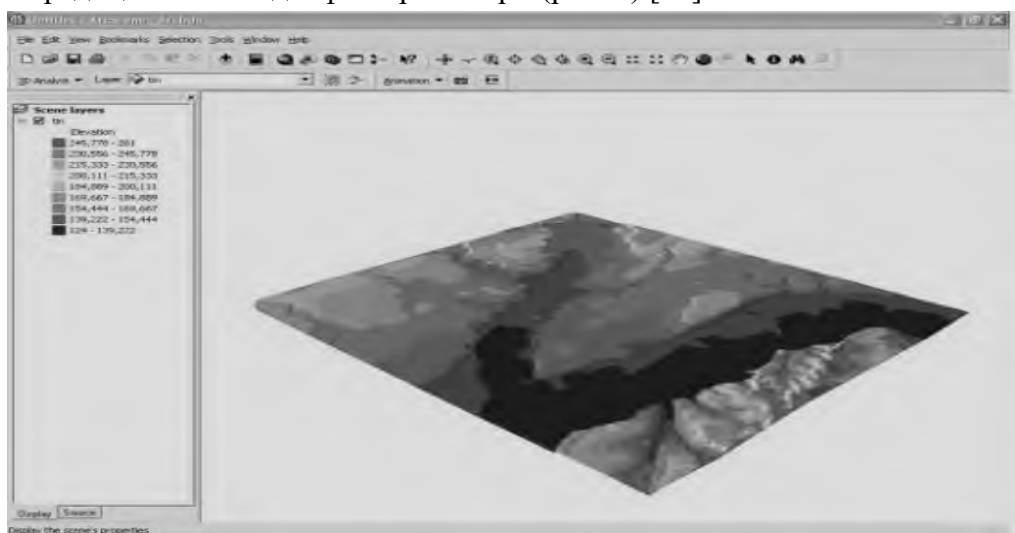


Рис. 3. Моделювання стану земельних ресурсів та території за допомогою лідарної технології

Джерело: [17].

Також слід відзначити, що лідари використовують в геодезії для виявлення стрибкоподібних змін земельного покрову або рельєфу, ерозійних процесів, видимих зсувів або інших деградаційних процесів, що впливають на якість земельних ресурсів і територій.

Саме завдяки високому рівню точності та швидкості збору цифрових даних, лідарні технології вже масово використовуються для всіх видів геодезичних робіт і досліджень у напрямку оцінювання стану земель у віддалених районах. Це необхідно для отримання цифрових геоданих високої якості у найкоротші терміни. Лідарні знімки можна інтегрувати з даними інших джерел, таких як GNSS або БПЛА, для створення комплексних геоінформаційних систем, що забезпечують багатовимірний підхід до оцінки земельних ресурсів.

4. Гібридне позиціонування – метод, що направлений на визначення місцеположення в земельному ареалі, який використовує комбінацію (парні поєднання) різних геотехнологій, таких як глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), інерційні навігаційні системи (INS), наземні радіолокаційні системи, а також різноманітні сенсори (лідар, камери, ультразвукові датчики). Основна мета такого підходу полягає у забезпеченні високої точності та надійності даних у випадках, коли одна з технологій не може повністю задовольнити вимоги до точності виконання геодезичних робіт або відбувається втрата внутрішніх технологічних можливостей через зовнішні фактори [18]. Подібні речі можливі при поганих погодних умовах або в умовах урбанізованих територій, де супутниковий сигнал може бути заблокований (невільований) (рис. 4).

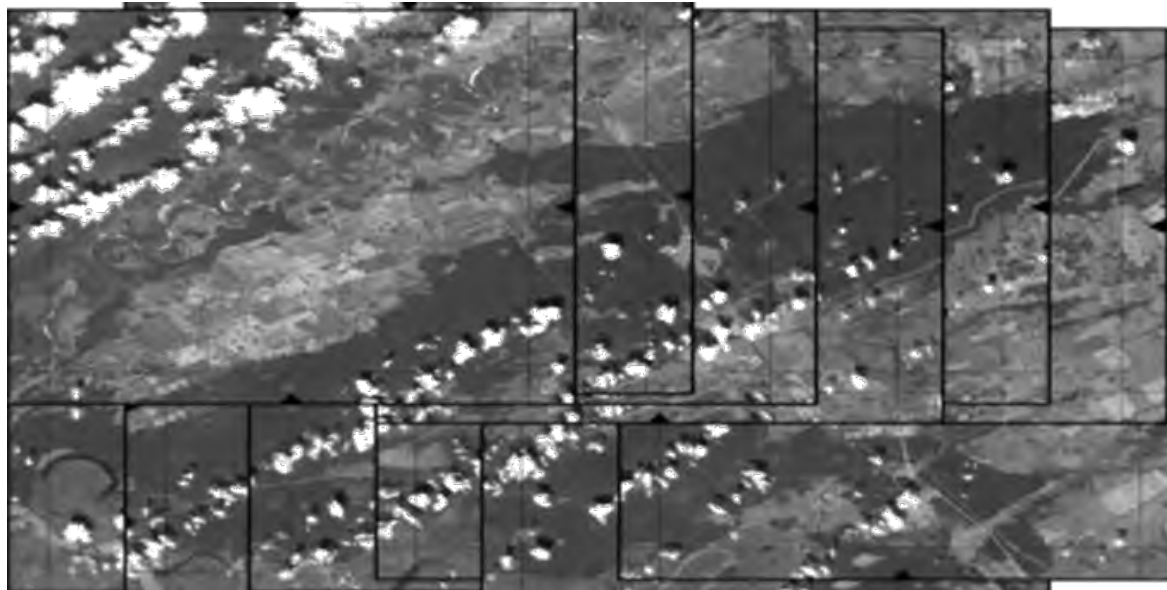


Рис. 4. Невільована цифрова модель земельного ареалу за допомогою техніки гібридного позиціонування [19]

Джерело: [19].

Констатуємо, що використання технології GNSS технічно формує можливість точного визначення координат в умовах відкритого простору, однак у густо забудованих міських районах або в умовах лісових масивів точність GNSS може значно знижуватися. У таких ситуаціях гібридне позиціонування використовує INS, яка здатна забезпечити безперервність даних про положення та рух об'єкта, навіть коли супутниковий сигнал тимчасово відсутній. Парна інтеграція двох технологій GNSS та INS здатна утворити прецедент компенсації недоліків від кожної окремої системи та забезпечити безперервний моніторинг місцеположення для віддалених земельних територій з високим рівнем точності.

Гібридне позиціонування в геодезичній оцінці земельних ресурсів у ряді віддалених районів формує ключові напрямки використання через створення кадастрових карт та оновлення геодезичних даних у реальному часі. Для віддалених районів, де існують проблеми з доступом до стабільного супутникового сигналу, гібридне позиціонування це вихід з проблемної ситуації, тому що може бути технічно продовжений збір геоданих без необхідності зупинки виконуваних геодезичних робіт [20]. Подібні технічні рішення фактично утворюють нову цифрову ефективність виконання геодезичних робіт, та знижують операційні витрати на проведення будь-яких видів геодезичного знімання і пошукових робіт тощо. У табл. 1 наведено інформаційне узагальнення для досліджених геодезичних технологій, що використовуються для формування комплексної оцінки земельних ресурсів у віддалених районах.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз використання геодезичних технологій для проведення комплексної оцінки земельних ресурсів у віддалених районах

Геодезична технологія	Визначальна характеристика	Провідна перевага використання	Наявний геодезичний ефект	Оцінка цифрової спрямованості
1. Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS)	Точне позиціонування та координування в будь-якому місці земної кулі	Висока точність і незалежність від погодних умов	Ефективне виконання кадастрового знімання та моніторинг змін земельного покриву	Висока
2. Безпілотні літальні апарати (БПЛА)	Аерофотознімання з високою роздільною здатністю	Збирання даних на великих площах та у важкодоступних місцях	Зменшення витрат на геодезичні роботи та мінімізація ризиків	Висока
3. Лідарні технології	Використання лазерного випромінювання для вимірювання відстаней до об'єктів	Створення високоточних тривимірних моделей поверхні землі	Виявлення змін рельєфу та інших процесів, що впливають на стан земельних ресурсів	Висока
4. Технологія гібридного позиціонування	Інтеграція різних технологій для забезпечення високої точності	Компенсація недоліків окремих систем позиціонування	Забезпечення безперервного моніторингу з високою точністю	Дуже висока
5. Інерційні навігаційні системи (INS)	Забезпечення безперервності даних про положення та рух об'єкта	Робота без необхідності супутникового сигналу	Підтримка точності в умовах обмеженого доступу до супутникових сигналів	Середня

Джерело: сформовано авторами.

Отже, обґрунтовані та виділені геодезичні технології здатні значно розширити технології надання оцінки якісного стану виділених земельних ресурсів, особливо у віддалених районах з обмеженим рівнем доступу або наявними складними географічними умовами. Після збору даних у віддалених районах постає необхідність їх обробки та інтерпретації і тут самі процедури обробки геодезичних даних мають принципово містити ряд етапів, а саме: а) попередня обробка, б) геоприв'язка, в) системний аналіз, г) цифрова візуалізація геодезичного контенту тощо. Кожен із цих етапів містить принципові та одноосібні особливості, залежно від типу геодезичних даних та взятих технологій для проведення геодезичних досліджень.

Отже, на першому етапі здійснення попередньої обробки слід провести фільтрацію зібраних геодезичних даних, видалити всі «шуми» та візуальні помилки проведених вимірювань. Для цього доцільно запровадити практику застосування спеціалізованих програмних пакетів, які дозволяють автоматизувати більшість рутинних процесів та забезпечити високу точність розрахункової й візуальної обробки первинних даних. Це можуть бути зібрані дані з лідару, і вони мають «шуми» через віддзеркалення цифрового сигналу від листя або дрібних об'єктів на земній поверхні, і саме тому перед аналізом їх необхідно очистити.

Наступним, другим етапом є геоприв'язка даних, що передбачає встановлення їх відповідності з певною системою координат. Цю роботу можна виконати за допомогою технології GNSS або іншого джерела геоданих, і також принциповим є технічне забезпечення, щоб всі дані були правильно скомпоновані та відповідали єдиній системі координат, для формулювання основи для точного зіставлення і ведення подальшого аналізу отриманих цифрових геоданих.

Системний аналіз геодезичних даних (третій етап) включає вивчення отриманих вимірювань, їх моделювання та інтерпретацію. У принциповому полі зору вказаний процес має використовувати методи: математичного моделювання, статистичного аналізу та машинного навчання для виявлення тенденцій, змін рельєфу земельних ділянок (територій)

або інших характеристик виділеної місцевості. Усі геодані, які отримані з лідарів, слід брати за основу для створення цифрових моделей рельєфів територій, виявлення змін земного покриття або визначення обсягів переміщення ґрунту.

Цифрова візуалізація є останнім четвертим етапом обробки даних і включає представлення результатів у зручній для дослідників і інженерів формі, такій як цифрові карти, 3D-моделі місцевості або інтерактивні геоінформаційні системи (ГІС) у землекористуванні, і такі цифрові інструменти утворюють практичну і досконалу зручність при перегляді зібраних геоданих, порівняльному аналізі їх у контексті інших зібраних просторових даних тощо.

По-перше, традиційні методи геодезії зазвичай передбачають тривалі та трудомісткі польові роботи, що включають вимірювання на місцевості, обробку даних та їх аналіз, проте суцільне використання сучасних технологій, таких як GNSS та БПЛА, дозволяє значно зменшити час на виконання подібних робіт. Зазначаємо, що використання БПЛА дозволяє виконувати аерофотознімання великих площ у короткі терміни, що може замінити дні або тижні роботи на місцевості всього кількома годинами польотних робіт і знімання. Також не відстають і лідарні технології, які можуть вдало сприяти скороченню часу на проведення земельної оцінки, оскільки дозволяють швидко й точно збирати дані про рельєф місцевості, навіть у густо зарослих лісами або гірських (віддалених) районах. Завдяки можливості одночасного отримання великої кількості точок даних, лідара забезпечують більш швидко і точну оцінку, що знижує потребу в додаткових виїздах на досліджувану місцевість та скорочує витрати на проведення додаткових геодезичних вимірювань.

По-друге, нові геодезичні технології вже досить вдало забезпечують значне підвищення точності та надійності результатів у порівнянні з традиційними методами. Використання інструментарію GNSS надає геодезістам технічну можливість отримувати геодані з точністю до кількох сантиметрів, що є важливим для визначення меж земельних ділянок, створення кадастрових карт та моніторингу змін земного покриття. Завдяки GNSS геодані можна вільно збирати в режимі «онлайн», що зменшує ймовірність помилок і неточностей, пов'язаних з ручним введенням даних або іншими людськими крос-факторами.

Лідарні системи надають можливість отримувати тривимірні моделі поверхні землі з високою деталізацією, що є незамінним для аналізу змін рельєфу, виявлення зсувів, ерозії або інших геоморфологічних процесів. Вже сама висока точність лідарних технологій забезпечується за рахунок використання лазерного випромінювання, саме воно дозволяє проводити контрастні вимірювання навіть у важкодоступних місцевостях, віддалених районах, де традиційні методи фотограмметрії або оптичного знімання матимуть прогнозовано обмежені технічні можливості.

Впровадження самих БПЛА з різноманітними електронними сенсорами, що включають і фотокамери, інфрачервоні датчики та лідари, прогнозовано сформує широту можливостей отримання різноманітних геоінформаційних даних з високою роздільною здатністю, що підвищуватиме рівень точності аналізу та надасть перспективу постійно враховувати більше параметрів при оцінці стану земельних ресурсів. Завдяки можливості регулярного та частого моніторингу БПЛА мають потенціал для сприяння своєчасному виявленню змін на місцевості та можуть гарантовано забезпечити оперативне прийняття рішень на основі актуальних геоінформаційних даних. БПЛА технічно літають на великих відстанях і можуть виконувати завдання в умовах, що є небезпечними або непридатними для людей, так це актуально у гірських районах, зонах зсувів, або в місцях з високим ризиком природних катастроф. Зазначені складові є принциповими при утворенні моделі безпеки інженерного персоналу, але й зменшує ймовірність помилок, пов'язаних з людським фактором, таких як неправильно зібрані геодані або ненавмисні відхилення від методики збору і вимірювання (табл. 2).

Таблиця 2 – Інтеграційно-оціночна характеристика сучасних методів дослідження стану земельних ресурсів для віддалених районів

Рівень розвитку методу	Оцінка рівня автономності й універсальності	Нестандартні формати використання	Головна перевага системного використання
Високий (GNSS)	Висока автономність, універсальність для будь-яких умов	Використання в умовах обмеженого супутникового сигналу	Точність і незалежність від погодних умов
Середній (БПЛА)	Середня автономність, висока універсальність у відкритих просторах	Аерофотознімання великих площ у важкодоступних районах	Швидкість збору даних і зменшення витрат
Високий (Лідар)	Висока автономність, обмежена універсальність (ефективність у складних рельєфах)	Створення тривимірних моделей у лісистих та гористих районах	Висока точність даних і деталізація
Дуже високий (Гібридне позиціонування)	Дуже висока автономність, інтеграція різних технологій	Поєднання різних систем для забезпечення точності в складних умовах	Комплексність даних та безперервний моніторинг
Середній (INS)	Середня автономність, використання в умовах відсутності GNSS сигналу	Інерційне позиціонування в закритих або глибоких місцях	Забезпечення безперервності даних у складних умовах

Джерело: сформовано авторами.

Широка автоматизація процесу збору даних за допомогою сучасних технологій також зменшує ймовірність помилок, пов'язаних з ручним введенням даних, що сприяє підвищенню точності та надійності результатів.

Прикладна важливість застосування методів оцінки земельних ресурсів у віддалених районах полягає в оптимізації управління і використання земельних ділянок, забезпеченні екологічної стабільності та економічної ефективності. Методи дозволяють точно визначати стан земель, виявляти та попереджувати екологічні ризики, такі як ерозія чи деградація ґрунтів, а також відстежувати зміни землекористування. Результати дослідження сприятимуть створенню точних кадастрових карт, забезпеченню правової визначеності меж ділянок і розвитку інфраструктури. Застосування виділених методів формує базу ефективного планування сільськогосподарського, промислового або рекреаційного використання земель, що дозволяє підвищити продуктивність та захистити природні ресурси у важкодоступних територіях.

Висновки. Було досліджено техніко-організаційні можливості впровадження сучасних геодезичних технологій, таких як: глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS), безпілотні літальні апарати (БПЛА), лідарні технології та методи гібридного позиціонування для формування потоку точного оцінювання стану і якості земельних ресурсів віддалених та важкодоступних районів і територій. Було встановлено, що ці технології значно перевищують традиційні методи за точністю, швидкістю збору даних та зручністю інженерного і програмного використання. Було сформовано організаційні складові щодо імплементації ряду геодезичних технологій для геодезичної оцінки земельних ресурсів залежно від специфіки місцевості. Також було оцінено вплив сучасних геодезичних технологій на скорочення часу та витрат на формування процесу оцінки стану земельних ресурсів виділених територій.

Було обґрунтовано пропозицію по інтеграції даних, отриманих з різних цифрових джерел, для підвищення точності та надійності результатів при проведенні оцінювання земельних ділянок і рельєфу територій. Базою стає використання даних з GNSS, лідарів та БПЛА для створення комплексних геоінформаційних систем (ГІС), які і забезпечують багатовимірний підхід до землекористування та екологічного стану земельних ресурсів важкодоступних територій.

Список використаних джерел

1. Chabaniuk, V. Critical properties of modern geographic information systems for territory management / V. Chabaniuk, K. Polyvach // Cybernetics and Computer Engineering. – 2020. – № 3(201). – Pp. 5-32. DOI:10.15407/kvt201.03.005.

2. Fey, C. Remote sensing-based deformation monitoring and geological characterisation of an active deep-seated rock slide (Tellakopf/Cima di Tella, South Tyrol, Italy) / C. Fey, C. Rechberger, K. Voit // *Bull Eng Geol Environ.* – 2023. – № 82. – P. 85. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03101-x>
3. Villanueva, J. K. S. Optimization of ground control point (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (UAV) survey using structure from motion (SfM). *The International Archives of Photogrammetry / J. K. S. Villanueva, A. C. Blanco // Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* – 2019. – № 42. – Pp. 167-174. DOI:10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-167-2019.
4. Македон, В. В. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств / В. В. Македон, О. О. Байлова // *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки».* – 2023. – Вип. 47. – С. 16-26. DOI: 10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3.
5. Міхно, П. Особливості застосування сучасних геодезичних технологій у будівництві / П. Міхно, І. Лісовенко, Д. Бушуєв, І. Риженко // *Технічні науки та технології.* – 2022. – №3(29). – С. 198-209. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3\(29\)-198-209](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3(29)-198-209).
6. Гой, В. Проблеми та перспективи оцінки земельної власності геодезичними методами / В. Гой, В. Харів, І. Бурвіков // *Просторовий розвиток.* – 2024. – № 8. – С. 391-404. DOI: 10.32347/2786-7269.2024.8.391-404.
7. Козяр, В. Геодезичний і дистанційний моніторинг земель, відведених під сонячні електростанції / В. Козяр // *Технічні науки та технології.* – 2021. – №3(29). – С. 198-209. DOI: 10.25140/2411-5363-2022-3(29)-198-209.
8. Лапшій, М. Моніторинг використання земель у сучасних умовах в Україні / М. Лапшій, О.Гулько // *GeoTerrace-2018 : міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених, 13–15 грудня 2018 р., Львів, Україна.* – 2018. – С. 218-220 URL: <https://openreviewhub.org/geoterrace/paper/monitoring-vikoristannya-zemel-u-suchasni-umovah-v-ukrayini>.
9. Пілічева, М. Сучасні технології землеустрою та кадастру [Електронний ресурс] / М. Пілічева. – Харківський : Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, 2024. – Режим доступу: https://gis.kname.edu.ua/images/ONP_2023/Obov'yazkovi_onovlenna2024/RP_OK7_PhD_24_25_plan23_Piliceva.pdf.
10. Толчевська, О. Є. ГІС технології в землеустрої [Електронний ресурс] / О. Є. Толчевська, Ю. Г. Коняєв // *Екологічна безпека та природокористування.* – 2018. – С. 168-169. – Режим доступу: <https://repository.knuba.edu.ua/bitstreams/4b4e849c-5a04-484b-8daf-59e6cc2d83ed/download>.
11. Федоренко, Р. П. Оцінка земель в Україні: сучасний стан та перспективи розвитку [Електронний ресурс] / Р. П. Федоренко, О. В. Кравченко // *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції.* – 2023. – С. 179–182. – Режим доступу: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/37543/1/MMNPK_Planning_and_use_of_territories_within_the_context_of_inclusive_development_2023-179-182.pdf.
12. Digital Technology-and-Services-Driven Sustainable Transformation of Agriculture: Cases of China and the EU [Electronic resource] / T. Qin, L. Wang, Y. Zhou, L. Guo, G. Jiang, L. Zhang // *Agriculture.* – 2022. – №12. – P. 297. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/agriculture12020297>.
13. All Maps : U.S. Geological Survey [Electronic resource] // USGS.gov : Science for a changing world. – Mode of access: <https://www.usgs.gov/products/maps/all-maps>
14. Digital Outcrop Modelling and Geological Mapping: Shaping the Future of Geology [Electronic resource] // VRGS by VRGeoscience Limited. – Mode of access: <https://www.vrgeoscience.com/shaping-the-future-of-geology/>.
15. Каліна, І. І. Концептуальні засади побудови цифровізації аграрного сектору [Електронний ресурс] / І. І. Каліна // *Ефективна економіка.* – 2019. – № 10. – Режим доступу: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8232>.
16. The Long-Term Prediction of Landslide Processes within the Precarpathian Depression of the Cernivtsi Region of Ukraine / B. Hablovskiy, N. Hablovskaya, L. Shtohryn, D. Kasiyanchuk, M. Kononenko // *Journal of Ecological Engineering.* – 2023. – №24(7). – Pp. 254-262. <https://doi.org/10.12911/22998993/164753>.
17. Landsat Next Defined: Landsat Science [Electronic resource] // Landsat Science: A joint NASA/USGS Earth observation program. – Mode of access: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/landsat-next-defined>.

18.Македон, В. В. Управління внутрішніми інвестиційними проектами в регіональному промисловому кластері підприємств / В. В. Македон, О. Г. Михайленко // Підприємництво та інновації. – 2022. – Вип. 25. – С. 56-63. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-3583/25.9>.

19.Nikolayeva, O. Cartographic support for ecological monitoring / O. Nikolayeva, L. Romashova, O. Volkova // InterCarto. InterGIS. – 2013. – №1. – Pp. 84-86. 10.24057/2414-9179-2013-1-19-84-86.

20.Raising the level of financial security of the enterprise based on the basic risks differentiation / K. Pajak, V. Omelyanenko, V. Makedon, V. Shevchenko, I. Ovcharenko // Journal of Security and Sustainability Issues. – 2020. – № 10(1). – Pp. 115-130. DOI: [https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1\(9\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1(9)).

References

1. Chabaniuk, V., Polyvach, K. (2020). Critical properties of modern geographic information systems for territory management. *Cybernetics and Computer Engineering*, 3(201), 5–32. DOI: 10.15407/kvt201.03.005.

2. Fey, C., Rechberger, C., Voit, K. (2023). Remote sensing-based deformation monitoring and geological characterisation of an active deep-seated rock slide (Tellakopf/Cima di Tella, South Tyrol, Italy). *Bull Eng Geol Environ*, 82, 85. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03101-x>.

3. Villanueva, J. K. S., & Blanco, A. C. (2019). Optimization of ground control point (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (UAV) survey using structure from motion (SfM). *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 167–174. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-167-2019.

4. Makedon, V.V., Bailova, O.O. (2023). Planuvannya i orhanizatsiya vprovadzhennya tsyfrovyykh tekhnolohiy v diyal'nist' 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"*, Issue 47, 16-26. DOI: 10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3.

5. Mikhno, P., Lisovenko, I., Bushuiev, D., & Ryzhenko, I. (2022). Osoblyvosti zastosuvannya suchasnykh heodezychnykh tekhnolohiy u budivnytstvi [Features of application of modern geodesic technologies in constructing]. *Technical Sciences and Technology*, 3(29), 198–209.

6. Hoi, V., Khariv, V., Burvikov, I. (2024). Problemy ta perspektyvy otsinky zemel'noyi vlasnosti heodezychnymy metodamy [Problems and prospects of land ownership evaluation using geodetic methods]. *Prostorovyy rozvytok*, 8, 391–404. DOI: 10.32347/2786-7269.2024.8.391-404.

7. Kozyar, V. (2021). Heodezychnyy i dystantsiynyy monitorynh zemel', vidvedenykh pid sonyachni elektrostantsiyi [Geodetic and remote monitoring of lands allocated for solar power plants]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi*, 3(29), 198–209. DOI: 10.25140/2411-5363-2022-3(29)-198-209.

8. Lapshii, M., Hulko, O. (2018). Monitorynh vykorystannya zemel' u suchasnykh umovakh v Ukraini [Monitoring of land use in modern conditions in Ukraine]. *GeoTerrace*. <https://openreviewhub.org/geoterrace/paper/monitoring-vikorystannya-zemel-u-suchasnih-umovah-v-ukrayini>.

9. Pilicheva, M. (2024). Suchasni tekhnolohiyi zemleustroyu ta kadastru [Modern technologies of land management and cadastre]. Kharkivskyi natsionalnyi universytet miskoho hospodarstva imeni O. M. Beketova. [is.kname.edu.ua. https://gis.kname.edu.ua/images/ONP_2023/Obovyazkovi/onovlenna2024/RP_OK7_PhD_24_25_plan23_Piliceva.pdf](https://gis.kname.edu.ua/images/ONP_2023/Obovyazkovi/onovlenna2024/RP_OK7_PhD_24_25_plan23_Piliceva.pdf).

10.Tolchevska, O. Ye., Konyayev, Yu. H. (2018). HIS tekhnolohiyi v zemleustroyi [GIS technologies in land management]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannya*, 168–169. <https://repository.knuba.edu.ua/bitstreams/4b4e849c-5a04-484b-8daf-59e6cc2d83ed/download>.

11.Fedorenko, R. P., Kravchenko, O. V. (2023). Otsinka zemel v Ukraini: suchasnyy stan ta perspektyvy rozvytku [Land evaluation in Ukraine: current state and development prospects]. *Materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi*, 179–182. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/37543/1/MMNPK_Planning_and_use_of_territories_within_the_context_of_inclusive_development_2023-179-182.pdf.

12.Qin, T., Wang, L., Zhou, Y., Guo, L., Jiang, G., & Zhang, L. (2022). Digital Technology-and-Services-Driven Sustainable Transformation of Agriculture: Cases of China and the EU. *Agriculture*, 12, 297. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020297>.

13.U.S. Geological Survey (USGS). All Maps. (2023). <https://www.usgs.gov/products/maps/all-maps>.

14.Digital Outcrop Modelling and Geological Mapping: Shaping the Future of Geology. (2023). <https://www.vrgeoscience.com/shaping-the-future-of-geology>.

15. Kalina, I. (2019). Kontseptual'ni zasady pobudovy tsyfrovizatsiyi aharnoho sektoru [Conceptual principles of construction of digitalization of agricultural sector]. *Efektivna ekonomika*, 10. <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8232>.
16. Hablovskiy, B., Hablovska, N., Shtohryn, L., Kasiyanchuk, D., Kononenko, M. (2023). The Long-Term Prediction of Landslide Processes within the Precarpathian Depression of the Cernivtsi Region of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, 24(7), 254-262. <https://doi.org/10.12911/22998993/164753>.
17. NASA. Landsat Science. (2023). <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/landsat-next-defined>.
18. Makedon, V. V., Mykhalenko, O. G. (2022). Upravlinnya vnutrishnimy investytsiyynyh proektamy v rehional'nomu promyslovomu klasteri pidpryyemstv [Management of internal investment projects in the regional industrial cluster of enterprises]. *Entrepreneurship and innovation*, (25), 56-63. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/25.9>.
19. Nikolayeva, O., Romashova, L. & Volkova, O. (2013). Cartographic support for ecological monitoring. *InterCarto. InterGIS*, 1, 84-86. <https://doi.org/10.24057/2414-9179-2013-1-19-84-86>.
20. Pajak, K., Omelyanenko, V., Makedon, V., Shevchenko, V., Ovcharenko, I. (2020). Raising the level of financial security of the enterprise based on the basic risks differentiation. *Journal of Security and Sustainability Issues*, 10(1), 115-130. [https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1\(9\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1(9)).

Отримано 13.12.2024

UDC 528.4:528.6

Olena Herasymchuk¹, Vasyl Hoy², Vladyslav Khariv³

¹PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Earth Sciences
Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: kgt_gol@ztu.edu.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1279-1888>

²PhD in Economic Sciences, Doctoral Candidate

Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: vassgoi@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-1822-4478>

³ postgraduate

Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketov (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: v.khariv@ukr.net. **ORCID:** <http://orcid.org/0009-0006-7937-5324>

USING MODERN GEODESIC TECHNOLOGIES FOR LAND RESOURCES ASSESSMENT IN REMOTE AREAS

The article examines modern geodetic technologies used for land resource assessment in remote and hard-to-reach areas, including global navigation satellite systems (GNSS), unmanned aerial vehicles (UAVs), lidar technologies, and hybrid positioning methods. Their technical capabilities, including positioning accuracy, data collection speed, and efficiency in difficult geographical conditions, are analyzed. It is found that these tools provide the creation of high-precision maps, three-dimensional terrain models, and integrated geographic information systems (GIS). The potential of using GNSS for precise coordination and determination of land boundaries regardless of weather conditions or accessibility of territories is assessed. Approaches to using UAVs for high-resolution aerial photography have been developed, which allows for rapid acquisition of data on the condition of land resources and objects. The advantages of lidar technologies for creating three-dimensional terrain models, especially in difficult conditions, such as dense forests or mountainous areas, have been substantiated. Hybrid positioning methods have been proposed that combine GNSS with inertial navigation systems (INS), which guarantees continuous data collection even in the absence of a satellite signal. The stages of geodetic data processing, including filtering, georeferencing, system analysis, and digital visualization, which ensure the high quality of final results, have been investigated. The need to integrate data from various sources to create complex GIS is substantiated, which allows for considering a wide range of parameters when assessing the condition of lands. The application of these technologies to form cadastral maps, monitor land cover changes, identify environmental risks, and land use planning is proposed. The study results confirm the effectiveness of modern geodetic technologies in reducing costs, and increasing accuracy and speed of work. The conclusions obtained are the basis for further improvement of methods for assessing land resources and their adaptation to the specific conditions of remote areas.

Keywords: geodetic technologies; land resources; land management; geodetic search; geodata; land monitoring; digital visualization.

Fig.: 4. Table: 2. References: 14

**Ганна Вікторівна Кірейцева¹, Ілля Юрійович Циганенко-Дзюбенко²,
Олександр Миколайович Гнітецький³, Світлана Володимирівна Хоменко⁴**

¹кандидат економічних наук, докторантка, доцентка кафедри екології та природоохоронних технологій
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: gef_kgv@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1055-1784>

²аспірант III курсу кафедри екології та природоохоронних технологій
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: ke_miyu@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3240-8719>

³аспірант II курсу факультету гірничої справи, природокористування та будівництва
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: hnetetskyi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9806-6924>

⁴аспірантка II курсу кафедри екології та природоохоронних технологій
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: org_hsv@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7463-7867>

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ІНТЕГРАЦІЇ ВОДООХОРОННИХ ЗОН У ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ МІСЬКИХ КАДАСТРІВ

У статті досліджено проблему інтеграції водоохоронних зон у геоінформаційні системи міських земельних кадастрів. Проведено систематизацію та порівняльний аналіз існуючих підходів з урахуванням їхніх функціональних можливостей та обмежень. На основі аналізу практичного досвіду Житомирської міської територіальної громади розроблено програму поетапного впровадження геоінформаційної системи управління водоохоронними зонами. Запропоновано комплексні рішення для підвищення ефективності кадастрового обліку водоохоронних територій з урахуванням вимог до якості геопросторових даних.

Ключові слова: містобудівна документація; землі водного фонду; екологічна безпека; територіальна громада; землеустрій.

Рис.: 1. Бібл.: 27.

Актуальність теми дослідження. Стрімка урбанізація та інтенсивний розвиток міських територій створюють значний тиск на водні ресурси, що підкреслює критичну важливість ефективного управління водоохоронними зонами в контексті сталого розвитку міст. Інтеграція геоінформаційних інструментів у систему земельного кадастру стає ключовим фактором для покращення управління водоохоронними зонами та сприяння екологічній стійкості міського планування [1].

В умовах зростаючих екологічних викликів та виснаження водних ресурсів, розуміння того, як геоінформаційні технології можуть посилити включення водоохоронних зон у міське планування, набуває особливої актуальності. Геоінформаційні системи (ГІС) надають спеціалістам у сфері містобудування та планування територій та розробникам політики можливість візуалізувати, аналізувати та керувати просторовими даними, що робить їх незамінним інструментом у міському плануванні [2].

Для галузі геодезії та землеустрою актуальність теми визначається необхідністю вдосконалення методів інтеграції водоохоронних зон у земельні кадастри з використанням сучасних геоінформаційних технологій. Як зазначають Р. Фольк та інші [3], ефективність інтеграції водоохоронних зон у міський земельний кадастр значною мірою залежить від точності та достовірності кадастрових даних, що підкреслює важливість розробки надійних методик збору та управління даними.

Аналіз практики застосування геоінформаційних систем у землеустрої України виявляє суттєвий розрив між нормативно-правовим забезпеченням процесу встановлення водоохоронних зон та їх фактичною інтеграцією в кадастрові системи. Як зазначає А. Давидович [4], впровадження INSPIRE-сумісних кадастрових систем є ключовим фактором для ефективного управління екологічно важливими територіями, проте практичні підходи до такої інтеграції потребують суттєвого вдосконалення.

Сучасні геоінформаційні технології створюють нові можливості для верифікації та актуалізації просторових даних у земельному кадастрі [5], особливо в контексті адаптації міського планування до кліматичних змін та нових екологічних викликів. Однак існуючі дослідження здебільшого зосереджені на технічних аспектах геоінформаційних систем, залишаючи поза увагою комплексні підходи до інтеграції водоохоронних зон у кадастрові системи.

Запропонований у дослідженні підхід до системної інтеграції водоохоронних зон у геоінформаційні системи земельного кадастру враховує не лише технічні аспекти визначення меж (включаючи особливості рельєфу та гідрологічного режиму), але й забезпечує комплексне вирішення проблеми узгодження просторових даних з різних джерел. Це створює основу для підвищення ефективності управління водоохоронними територіями та забезпечення екологічної безпеки міст.

Постановка проблеми. Ключовою проблемою є недосконалість науково-методичних підходів до процесу інтеграції водоохоронних зон у геоінформаційні системи земельного кадастру. Відповідно до Водного кодексу України [6] та Порядку визначення розмірів і меж водоохоронних зон [7], встановлення таких зон є обов'язковим для створення сприятливого режиму водних об'єктів, запобігання їх забрудненню, засмічення і вичерпання. Проте за наявності законодавчо закріплених методик встановлення внутрішніх та зовнішніх меж водоохоронних зон, їх практична реалізація в геоінформаційних системах кадастру залишається недостатньо розробленою.

Аналіз нормативно-правової бази показує, що зовнішня межа водоохоронної зони має визначатися з урахуванням рельєфу місцевості, затоплення, берегоруйнування, меандрування річок та інших факторів. При цьому є розрив між теоретичними підходами та їх практичною реалізацією в кадастрових системах, що призводить до фрагментарності даних про водоохоронні зони та складнощів у визначенні їхніх меж. Земельний кодекс України [8] та Закон України «Про землеустрій» [9] передбачають необхідність відображення обмежень у використанні земель, включаючи водоохоронні зони, у документації із землеустрою та містобудівній документації, проте механізми інтеграції цих даних у геоінформаційні системи потребують вдосконалення.

Вирішення цієї проблеми важливе для систематизації та оцінки існуючих підходів до інтеграції водоохоронних зон у кадастрові системи, що дозволить визначити найбільш ефективні шляхи їх практичного впровадження. Це сприятиме покращенню процесів ухвалення рішень у сфері землеустрою та забезпеченню більш ефективного контролю за використанням прибережних територій. Особливої уваги це питання набуває в контексті вимог Водної Рамкової Директиви ЄС [10] щодо інтегрованого управління водними ресурсами, що передбачає необхідність впровадження басейнового принципу управління та відповідного геоінформаційного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання інтеграції геоінформаційних систем у процеси управління водоохоронними зонами та їх відображення в земельному кадастрі активно досліджується науковою спільнотою. Теоретичні та методологічні аспекти впровадження геоінформаційних систем у земельний кадастр досліджували Е. Зиск [1], А. Да Сільва [2], які розробили концептуальні засади ідентифікації та управління міськими територіями. Значний внесок у розвиток технологічних аспектів впровадження геоінформаційних систем зробили Р. Мілчєв [11] та Й. Печар-Іліч [12], запропонувавши інноваційні підходи до моніторингу в реальному часі та хмарні архітектури ГІС-рішень.

Методологічні засади залучення громадськості до процесів картографування та моніторингу водоохоронних зон розробив Дж. Годвіл [13]. Питання прогностичного моделювання та оцінки змін у водоохоронних зонах досліджували Р. Фольк [3] та Б. Вазірі [14], які створили комплексні системи оцінювання з використанням мультиспектрального аналізу.

Питання стандартизації та інтеграції геопросторових даних у кадастрові системи детально досліджували науковці А. Давідович [4], а також М. Міка [15]. Вони розробили методологію для створення систем, що відповідають вимогам INSPIRE. В свою чергу, вчені Л. Серра Белліні [16], а також П. Ескандон-Панчана [17] зосередили свої дослідження на впливі кліматичних змін на управління водоохоронними зонами. У своїх роботах вони систематизували геоматичні інструменти, які сприяють сталому розвитку територій.

Особливу увагу дослідники приділяли питанням оцінки екологічних впливів та створення базових геопросторових баз даних, що відображено в роботах С. Камара [5]. Проте, незважаючи на значну кількість досліджень, питання практичного впровадження геоінформаційних інструментів для інтеграції водоохоронних зон у міські земельні кадастри потребує подальшого вивчення.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На основі проведеного аналізу досліджень у сфері застосування геоінформаційних інструментів для інтеграції водоохоронних зон у міські кадастри виявлено декілька ключових аспектів, які залишаються недостатньо дослідженими. Насамперед, відсутня комплексна систематизація існуючих підходів до такої інтеграції, що суттєво ускладнює вибір оптимальних рішень для конкретних територіальних громад. Хоча в роботах [1; 3] розглянуто окремі технічні аспекти впровадження геоінформаційних систем, але відсутній порівняльний аналіз ефективності різних підходів.

Також залишається невирішеним питання механізмів координації та узгодження даних між різними джерелами інформації про водоохоронні зони, включаючи містобудівну документацію, землевпорядну документацію та екологічні дані, при їх інтеграції в єдину геоінформаційну систему міського кадастру. Особливо гостро ця проблема проявляється при аналізі практичних результатів застосування геоінформаційних інструментів у міських кадастрах України, де спостерігається значна фрагментарність даних та узгодженість підходів до їх представлення.

Важливим невирішеним аспектом залишається відсутність чітко визначених підходів до уніфікації даних про водоохоронні зони в геоінформаційних системах міських кадастрів відповідно до міжнародних стандартів. Зокрема, потребують детального дослідження механізми інтеграції даних з різних джерел, формати представлення просторової інформації про обмеження землекористування та способи забезпечення сумісності даних з європейськими геоінформаційними системами.

Крім того, недостатньо вивченим залишається взаємозв'язок між рівнем інтеграції водоохоронних зон у міські кадастри та ефективністю управління водними ресурсами, а також впливом на екологічну стійкість міських територій. Вирішення цих питань має критичне значення для забезпечення ефективного впровадження геоінформаційних інструментів у практику управління водоохоронними зонами українських міст та досягнення сталого розвитку міських територій.

Метою дослідження є систематизація існуючих підходів до інтеграції водоохоронних зон у геоінформаційні системи міських кадастрів та розробка на їх основі комплексного рішення з урахуванням аналізу практичного досвіду Житомирської міської територіальної громади.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення мети дослідження спершу проведено систематизацію існуючих підходів до інтеграції водоохоронних зон у міські земельні кадастри. На сучасному етапі розвитку геоінформаційних технологій сформувалось декілька основних підходів, які різняться за функціональним призначенням, технічними характеристиками та ефективністю впровадження (табл. 1). ГІС-моніторинг у реальному часі [11] забезпечує оперативний збір та обробку даних через IoT-датчики, що дозволяє

швидко реагувати на зміни, проте потребує значних інвестицій в інфраструктуру. Партиципативні геоінформаційні системи [13] базуються на залученні громади до картографування, що підвищує якість локальних даних, але вимагає значного часу на впровадження. Хмарні рішення [12] забезпечують доступність та масштабованість системи, хоча мають обмеження щодо безпеки даних. Прогностичне моделювання [1] дозволяє аналізувати сценарії розвитку територій, а інтегрована система кадастру [15] забезпечує комплексний підхід до управління даними. Мультиспектральний аналіз [14] надає можливість точного моніторингу великих територій, але залежить від погодних умов та потребує значних фінансових ресурсів. Аналіз цих підходів показує, що найбільш ефективним є застосування комплексного підходу, який поєднує елементи всіх напрямів, забезпечуючи як технологічну досконалість, так і практичну застосовність системи.

Таблиця 1 - Порівняльний аналіз підходів до інтеграції водоохоронних зон у геоінформаційні системи земельного кадастру

Підхід	Основні характеристики	Кількісні показники ефективності	Обмеження
ГІС-моніторинг у реальному часі [11]	- використання датчиків IoT; - збір даних у режимі реального часу; - постійний моніторинг якості води	- частота оновлення: 15 хв; - точність меж: $\pm 0,5$ м; - надійність: 99,9 %	- висока вартість впровадження; - потреба в технічній інфраструктурі
Партиципативні ГІС [13]	- залучення громади; - використання локальних знань; - спільне картографування	- активних користувачів: >1000; - точність даних: 85 %; - верифікація: 24 год	- потребує значного часу; - можливі конфлікти інтересів
Хмарні ГІС-рішення [12]	- зберігання даних у хмарі; - спільний доступ до даних; - інтеграція різних джерел	- доступність: 99,95 %; - час обробки: <2 сек; - обсяг даних: до 10 Тб	- залежність від інтернету; - питання безпеки даних
Прогностичне моделювання [1]	- аналіз сценаріїв розвитку; - оцінка ризиків; - моделювання впливів	- точність: 87 %; - горизонт: 5 років; - факторів: >20	- складність верифікації моделей; - потреба у великих наборах даних
Інтегрована система кадастру [15]	- поєднання різних типів даних; - стандартизація форматів; - єдина база даних	- підтримка форматів: 15+; - повнота даних: 95 %; - інтеграція: <1 доба	- складність впровадження; - висока вартість розробки
Мультиспектральний аналіз [14]	- використання даних ДЗЗ; - аналіз різних спектрів; - моніторинг змін	- роздільна здатність: 0,5-10 м; - кількість спектральних каналів: 4-8; - періодичність оновлення: 16 днів	- залежність від погодних умов; - висока вартість даних

Джерело: розроблено авторами за працями [1; 12; 13; 14; 15].

Отже, на основі проведеного аналізу запропоновано комплексний підхід, який інтегрує найбільш ефективні елементи розглянутих технологій для ефективного відображення водоохоронних зон у міських кадастрах. Ключовими елементами такої інтеграції є поєднання даних дистанційного зондування, результатів геодезичних вимірювань та матеріалів містобудівної документації в єдиній геоінформаційній системі. При цьому особлива увага приділяється забезпеченню узгодженості просторових даних через застосування єдиної системи координат та уніфікованих форматів даних, що дозволяє мінімізувати похибки при визначенні меж водоохоронних зон.

Важливим елементом запропонованого комплексного підходу є розроблена система забезпечення якості просторових даних, яка реалізується відповідно до вимог Закону України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність» [18] та Порядку ведення Державного земельного кадастру [19]. Система базується на багаторівневому контролі, що починається з польового етапу робіт, де згідно з вимогами ДБН В.1.3-2:2010 «Геодезичні роботи у будівництві» [20] здійснюється калібрування та перевірка геодезичного обладнання, виконуються контрольні вимірювання.

На етапі камеральної обробки забезпечується топологічна узгодженість даних відповідно до ДСТУ 8774:2018 «Географічна інформація. Правила моделювання геопросторових даних» [21] та вимог Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування [22]. Особлива увага приділяється контролю геометричних характеристик об'єктів згідно з вимогами Порядку ведення Державного земельного кадастру [19]. Верифікація результатів здійснюється шляхом порівняльного аналізу отриманих даних з матеріалами Державного фонду топографо-геодезичних даних та перевірки їх відповідності вимогам Водного кодексу України щодо встановлення меж водоохоронних зон.

Для реалізації системи контролю якості використовуються геоінформаційні системи QGIS та ArcGIS, які забезпечують інструментарій для перевірки та підтримки якості геопросторових даних згідно з принципами, визначеними у ISO 19157:2013 Geographic information – Data quality [23]. Обробка даних здійснюється згідно з вимогами Закону України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» [24]. Такий підхід забезпечує формування єдиного інформаційного середовища для управління якістю просторових даних про водоохоронні зони відповідно до сучасних стандартів геопросторових даних.

Інтеграція водоохоронних зон у геоінформаційні системи земельного кадастру має базуватися на чітких нормативно-правових засадах. В Україні порядок встановлення та використання водоохоронних зон регулюється Водним кодексом України [6], Земельним кодексом України [8], Законами України «Про землеустрій» [9] та «Про регулювання містобудівної діяльності» [25], а також Порядком визначення розмірів і меж водоохоронних зон та режимом ведення господарської діяльності в них [7]. Ці нормативно-правові акти визначають:

- цільове призначення водоохоронних зон (створення сприятливого режиму водних об'єктів, попередження забруднення, збереження екосистем);
- структурні елементи (заплава річки, перша надзаплавна тераса, бровки і круті схили берегів, прилеглі балки та яри);
- принципи встановлення меж (внутрішня - мінімальний рівень води, зовнішня - з урахуванням природних та антропогенних факторів);
- режим господарської діяльності (обмеження щодо використання пестицидів, розміщення об'єктів, скидання стічних вод).

Відповідно до статті 110 Земельного кодексу України [8] та статті 32 Закону України «Про Державний земельний кадастр» [26], відомості про межі водоохоронних зон вносяться до Державного земельного кадастру як обмеження у використанні земель. Це створює правову основу для їх відображення в геоінформаційних системах.

Для оцінки ефективності запропонованого комплексного підходу та визначення особливостей його практичної реалізації розглянемо досвід впровадження в Житомирській міській територіальній громаді. Аналіз стану використання геоінформаційних інструментів для інтеграції водоохоронних зон у земельні кадастри Житомирської міської територіальної громади виявив низку системних проблем. У межах офіційного кадастрового поділу території виявлено суттєвий дисбаланс між нормативними вимогами та фактичним станом обліку водоохоронних зон. Хоча законодавством передбачено обов'язкове відображення водоохоронних зон у земельному кадастрі, фактично на території громади обліковуються лише 12 земельних ділянок категорії «землі водного фонду» загальною площею 39,4394 га (рис. 1).

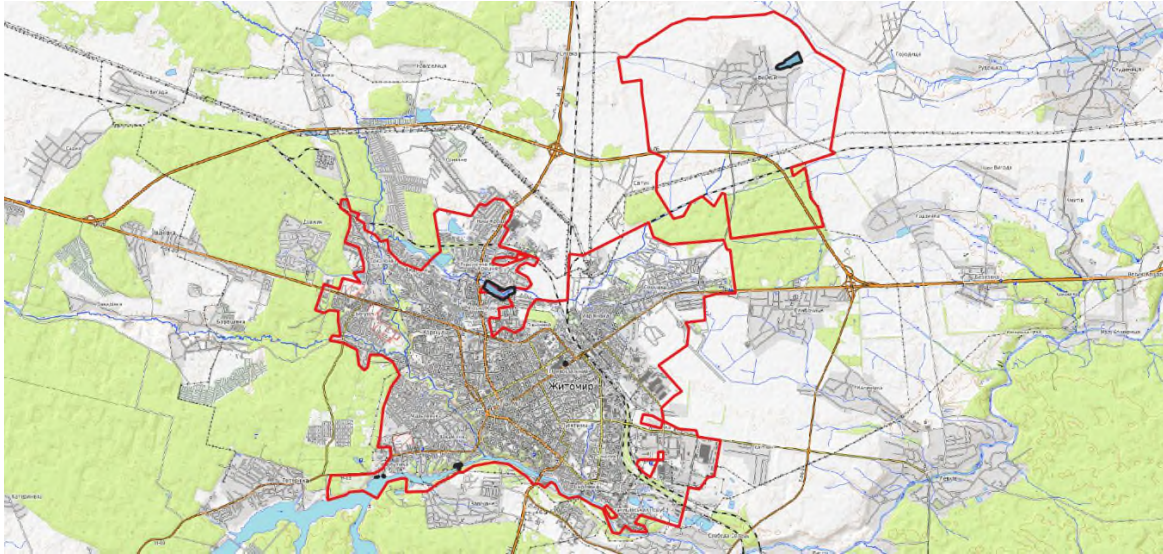


Рис. 1. Карта ділянок земель водного фонду Житомирської міської ТГ (сформовано авторами за кадастровим поділом [27]):

■ - межі ділянки земель водного фонду

Структурний аналіз цих ділянок показує, що 58 % площ (22,9282 га) призначені для рибогосподарських потреб; 35 % (13,8247 га) - для експлуатації гідротехнічних споруд; 7 % (2,6865 га) - інше призначення. Детальне дослідження виявило критичні невідповідності у класифікації земель. Зокрема, ділянка площею 0,5329 га на території ТРЦ "Глобал" помилково віднесена до земель водного фонду, що свідчить про недосконалість системи класифікації та верифікації даних. Просторовий аналіз розміщення земель водного фонду демонструє їх нерівномірний розподіл територією громади. Найбільша концентрація ділянок спостерігається в районі провулку 2-й Кривий (5 ділянок загальною площею 1,8247 га), що свідчить про відсутність системного підходу до визначення та картографування водоохоронних зон.

Порівняння фактичних даних із нормативними вимогами щодо розмірів водоохоронних зон (від 1000 метрів для річок) показує, що існуюча система кадастрового обліку охоплює менше 10 % необхідних територій. Це створює суттєві ризики для екологічної безпеки водних об'єктів та ускладнює реалізацію природоохоронних заходів.

Для покращення ситуації необхідне системне вдосконалення використання геоінформаційних інструментів, включаючи впровадження сучасних ГІС для картографування водоохоронних зон, проведення повної інвентаризації земельних ділянок водного фонду та гідроспоруд, інтеграцію актуальних даних про водоохоронні зони у кадастрові карти міста. Особливу увагу слід приділити розробці системи моніторингу за дотриманням режиму використання водоохоронних зон із використанням сучасних геоінформаційних технологій.

На основі проведеного дослідження розроблено комплексну програму впровадження геоінформаційної системи управління водоохоронними зонами, яка передбачає п'ять послідовних етапів реалізації протягом 2025-2030 років (табл. 2).

Підготовчий етап (2025-2026 рр.) зосереджений на формуванні інформаційної бази системи шляхом проведення детального аудиту існуючих 12 ділянок водного фонду та створення єдиної бази геопросторових даних згідно з вимогами ДСТУ 8774:2018. Для реалізації цього етапу використовується програмне забезпечення QGIS/ArcGIS для обробки та інтеграції просторових даних, отриманих за допомогою GNSS-приймачів геодезичного класу точності (RTK-режим) та інших методів геодезичних вимірювань згідно з ДБН В.1.3-2:2010. Точність визначення координат забезпечується відповідним геодезичним обладнанням та методикою виконання робіт.

Таблиця 2 - Програма поетапного впровадження геоінформаційної системи управління водоохоронними зонами (на прикладі Житомирської міської ТГ)

Етап	Терміни	Заходи	Методи та технічні рішення	Очікувані результати
Підготовчий	2025-2026	аудит існуючих даних про 12 ділянок водного фонду; створення бази геопросторових даних згідно з ДСТУ 8774:2018	QGIS/ArcGIS для обробки даних; GNSS-вимірювання згідно з ДБН В.1.3-2:2010	єдина база геоданих згідно стандартів; верифіковані межі ділянок
Геодезичне забезпечення	2026-2029	створення опорної геодезичної мережі; топографічне знімання прибережних територій; паспортизація водосховищ	наземні геодезичні вимірювання; дистанційне зондування; батиметричні дослідження	опорна геодезична мережа; цифрові паспорти водосховищ
Розробка ГІС	2026-2028	створення багатопарової ГІС; інтеграція з містобудівною документацією	веб-ГІС з відкритим кодом; система контролю якості даних; хмарне зберігання	функціонує ГІС; система верифікації даних
Впровадження	2027-2028	навчання персоналу; тестування системи; верифікація даних згідно нормативів	онлайн-тренінги; польові випробування; експертна оцінка	підготовлений персонал; протестована система; верифіковані дані
Моніторинг	2028-2030	впровадження системи моніторингу якості води; створення системи раннього оповіщення	ІоТ-сенсори; гідрологічне моделювання; інтеграція з регіональними системами	система моніторингу; карти ризиків; система оповіщення

Етап геодезичного забезпечення (2026-2029 рр.) включає створення опорної геодезичної мережі, проведення топографічного знімання прибережних територій та комплексне обстеження трьох ключових водосховищ території громади («Відсічне», «Житомирське», «Дениші»). Роботи виконуються з використанням наземних геодезичних вимірювань, методів дистанційного зондування та батиметричних досліджень. Результатом етапу є створення опорної геодезичної мережі та цифрових паспортів водосховищ з актуальною інформацією про їх стан та характеристики.

Етап розробки ГІС (2026-2028 рр.) передбачає створення багатопарової геоінформаційної системи відповідно до вимог Закону України «Про національну інфраструктуру геопросторових даних» з інтеграцією містобудівної документації. Технічне рішення базується на використанні веб-ГІС з відкритим кодом, впровадженні системи контролю якості даних та хмарним зберіганням, що забезпечує гнучкість та масштабованість системи.

Етап впровадження (2027-2028 рр.) фокусується на підготовці персоналу, тестуванні системи та верифікації даних згідно з нормативними вимогами. Проводяться онлайн-тренінги, польові випробування та експертна оцінка результатів, що забезпечує ефективне функціонування системи та її коректне використання.

Завершальний етап моніторингу (2028-2030 рр.) спрямований на впровадження системи моніторингу якості води та створення системи раннього оповіщення. Використання ІоТ-сенсорів та методів гідрологічного моделювання, інтеграція з регіональними системами дозволяє сформулювати комплексну систему моніторингу, створити карти ризиків та забезпечити оперативне реагування на зміни стану водних об'єктів.

Запропонована програма враховує специфіку території громади, наявні ресурси та вимоги чинного законодавства, що створює передумови для її успішної реалізації та досягнення поставлених цілей щодо ефективного управління водоохоронними зонами.

Висновки. Проведений аналіз підходів до інтеграції водоохоронних зон у геоінформаційні системи земельного кадастру та їх практичного застосування на прикладі Житомирської міської територіальної громади дозволив визначити основні напрями вдосконалення цього процесу. Систематизація існуючих методів виявила шість основних підходів до впровадження геоінформаційних інструментів, серед яких найбільш ефективним визначено комплексний підхід, що поєднує елементи різних технологічних рішень з урахуванням специфіки конкретної території.

Аналіз практичного стану інтеграції водоохоронних зон у кадастрову систему Житомирської міської ТГ виявив суттєві недоліки в організації геопросторових даних. Встановлено, що із загальної площі земель водного фонду 39,4394 га лише частина відповідає своєму цільовому призначенню, наявні проблеми з коректністю класифікації земельних ділянок та визначенням меж водоохоронних зон згідно з чинними нормативними вимогами.

Розроблено програму поетапного впровадження геоінформаційної системи управління водоохоронними зонами на період 2025-2030 рр., яка включає п'ять послідовних етапів: підготовчий, геодезичне забезпечення, розробка геоінформаційних систем, впровадження та моніторинг. Кожен етап передбачає використання сучасних технологій та дотримання вимог національних стандартів щодо якості геопросторових даних. Запропоновані рішення базуються на комплексному застосуванні геоінформаційних інструментів з урахуванням нормативно-правової бази та технічних можливостей реалізації, що створює основу для ефективного управління водоохоронними зонами міських територій.

Список використаних джерел

1. *Konsepca systemu informacji geograficznej do identyfikacji zdegradowanych obszarów miejskich jako części systemu zarządzania zasobami gruntów – studium przypadku Polski* / E. Zysk, A. Dawidowicz, S. Żróbek, R. Żróbek // *Cities*. – 2020. – Vol. 96. – P. 102423. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CITIES.2019.102423>.
2. *Da Silva, A. Smart governance based on multipurpose territorial cadastre and geographic information system: An analysis of geoinformation, transparency and collaborative participation for Brazilian capitals* / A. Da Silva, R. Fernandes // *Land Use Policy*. – 2020. – Vol. 97. – P. 104752. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104752>.
3. *Urban Resource Assessment, Management, and Planning Tools for Land, Ecosystems, Urban Climate, Water, and Materials—A Review* / R. Volk, M. Rambhia, E. Naber, F. Schultmann // *Sustainability*. – 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14127203>.
4. *System architecture of an INSPIRE-compliant green cadastre system for the EU Member State of Poland* / A. Dawidowicz, M. Kulawiak, E. Zysk, K. Kocur-Bera // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. – 2020. – Vol. 20. – P. 100362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100362>.
5. *Kamara, S. Development of a Geographic Information Systems Baseline Spatial Geodatabase Template for Evaluating Potential and Predicted Environmental Impacts for Sustainable Environmental Impact Assessment of Mining in Sierra Leone* / S. Kamara // *Journal of Geoscience and Environment Protection*. – 2020. DOI: <https://doi.org/10.4236/gep.2020.810018>.
6. *Водний кодекс України [Електронний ресурс]* : Закон України від 06.06.1995 р. № 213/95-ВР : станом на 15 листоп. 2024 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр#Text>.
7. *Про Порядок визначення розмірів і меж водоохоронних зон та режим ведення господарської діяльності в них [Електронний ресурс]* : Постанова Кабінету Міністрів України від 08.05.1996 р. № 486 : станом на 24 лип. 2021 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/486-96-п#Text>.
8. *Земельний кодекс України [Електронний ресурс]* : Закон України від 25.10.2001 р. № 2768-III : станом на 15 листоп. 2024 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>.
9. *Про землеустрій [Електронний ресурс]* : Закон України від 22.05.2003 р. № 858-IV : станом на 15 листоп. 2024 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text>.
10. *Про встановлення рамок діяльності Співтовариства в галузі водної політики [Електронний ресурс]* : Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту і Ради від 23 жовт. 2000 р. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text.
11. *Miltchev, R. Optimizing the processing of large amounts of spatial data related to the ecosystem water service provided by forest territories* / R. Miltchev, N. Shuleva, G. Milchev // *Acta Scientifica Naturalis*. – 2022. – Vol. 9. – Pp. 10-24. DOI: <https://doi.org/10.2478/asn-2022-0018>.

12. Pecar-Ilic, J. Application of GIS and Web technologies for Danube waterway data management in Croatia / J. Pecar-Ilic, I. Ruzic // *Environ. Model. Softw.* – 2006. – Vol. 21. – Pp. 1562–1571. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.05.003>.
13. Godwyll, J. M. Participatory GIS for inland water cadastre: case of Densuano, Koforidua, Ghana [Electronic resource] : PhD thesis / J. M. Godwyll. – KNUST, 2016. – 185 p. – Accessed mode: <https://ir.knust.edu.gh/bitstream/123456789/9161/1/JOSEPHINE-MARIE%20GODWYLL.pdf>.
14. Waziri, B. A. The Potentials of Geodatabase in the development control Process of the Department of Development Control Abuja Metropolitan Management Council : PhD thesis / B. A. Waziri. – AUST, 2024. – 245 p.
15. The concept of using the water cadastre databases components for the construction of multi-dimensional cadastre in Poland / M. Mika, M. Siejka, P. Leń, Ż. Król // *Survey Review.* – 2018. – Vol. 50. – Pp. 201-211. DOI: <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1263180>.
16. Serra Bellini, L. A heterogenous-source geoinformation system to manage climate-induced modifications on the landscape for sustainable development [Electronic resource] / L. Serra Bellini, A. Spanò, M. Cittadini Bellini, F. Giulio Tonolo // *Discover Sustainability.* – 2024. – Vol. 5, No. 1. – P. 297. – Accessed mode: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-024-00516-8>.
17. Escandón-Panchana, P. Review of agricultural cadastre approaches using geomatics for rural development / P. Escandón-Panchana, G. Herrera-Franco, M. Jaya-Montalvo, S. Martínez-Cuevas // *WIT Transactions on Ecology and the Environment.* – 2024. – Vol. 262. – Pp. 465-478. DOI: <https://doi.org/10.2495/SDP240391>.
18. Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність [Електронний ресурс] : Закон України від 23.12.1998 р. № 353-XIV : станом на 27 груд. 2024 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>.
19. Про затвердження Порядку ведення Державного земельного кадастру [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України від 17.10.2012 р. № 1051 : станом на 10 серп. 2024 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-п#Text>.
20. ДБН В.1.3-2:2010. Геодезичні роботи у будівництві [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199637436816688486?doc_type=2.
21. ДСТУ 8774:2018. Географічна інформація. Правила моделювання геопросторових даних [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78080.
22. Про затвердження Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування [Електронний ресурс] : Постанова Кабінету Міністрів України від 04.09.2013 р. № 661 : станом на 04 вер. 2013 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/661-2013-п#Text>.
23. ISO 19157:2013. Geographic information – Data quality [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/32575/cfc99e628ec6449c8a657df4061a0c7b/ISO-19157-2013.pdf>.
24. Про національну інфраструктуру геопросторових даних [Електронний ресурс] : Закон України від 13.04.2020 р. № 554-IX : станом на 13 квіт. 2020 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text>.
25. Про регулювання містобудівної діяльності [Електронний ресурс] : Закон України від 17.02.2011 р. № 3038-VI : станом на 15 листоп. 2024 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text>.
26. Про Державний земельний кадастр [Електронний ресурс] : Закон України від 07.07.2011 р. № 3613-VI: станом на 08 листоп. 2024 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17#Text>.
27. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру [Електронний ресурс]: офіційний веб-портал. – Режим доступу: <https://land.gov.ua/>.

References

1. Zysk, E., Dawidowicz, A., Żróbek, S., Żróbek, R. (2020). Koncepcja systemu informacji geograficznej do identyfikacji zdegradowanych obszarów miejskich jako części systemu zarządzania zasobami gruntów – studium przypadku Polski. *Cities*, 96, 102423. <https://doi.org/10.1016/J.CITIES.2019.102423>.

2. Da Silva, A., & Fernandes, R. (2020). Smart governance based on multipurpose territorial cadastre and geographic information system: An analysis of geoinformation, transparency and collaborative participation for Brazilian capitals. *Land Use Policy*, 97, 104752. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104752>.
3. Volk, R., Rambhia, M., Naber, E., & Schultmann, F. (2022). Urban Resource Assessment, Management, and Planning Tools for Land, Ecosystems, Urban Climate, Water, and Materials – A Review. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14127203>.
4. Dawidowicz, A., Kulawiak, M., Zysk, E., & Kocur-Bera, K. (2020). System architecture of an INSPIRE-compliant green cadastre system for the EU Member State of Poland. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100362. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100362>.
5. Kamara, S. (2020). Development of a Geographic Information Systems Baseline Spatial Geodatabase Template for Evaluating Potential and Predicted Environmental Impacts for Sustainable Environmental Impact Assessment of Mining in Sierra Leone. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.810018>.
6. Water Code of Ukraine. (2024), Law of Ukraine No. 213/95-VR of June 6, 1995 (as amended up to November 15, 2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр#Text>.
7. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2021), Resolution No. 486 "On the Procedure for Determining the Size and Boundaries of Water Protection Zones and the Regime of Economic Activity in them" of May 8, 1996 (as amended up to July 24, 2021). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/486-96-п#Text>.
8. Land Code of Ukraine. (2024), Law of Ukraine No. 2768-III of October 25, 2001 (as amended up to November 15, 2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>.
9. Law of Ukraine "On Land Management". (2024), Law No. 858-IV of May 22, 2003 (as amended up to November 15, 2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text>.
10. European Parliament and Council. (2000), Directive 2000/60/EC of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Retrieved November 28, 2024. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text.
11. Miltchev, R., Shuleva, N., & Milchev, G. (2022). Optimizing the processing of large amounts of spatial data related to the ecosystem water service provided by forest territories. *Acta Scientifica Naturalis*, 9, 10-24. <https://doi.org/10.2478/asn-2022-0018>.
12. Pecar-Ilic, J., & Ruzic, I. (2006). Application of GIS and Web technologies for Danube waterway data management in Croatia. *Environ. Model. Softw.*, 21, 1562-1571. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.05.003>.
13. Godwyll, J. M. (2016). Participatory GIS for inland water cadastre: case of Densuano, Koforidua, Ghana (Doctoral dissertation). <https://ir.knust.edu.gh/bitstream/123456789/9161/1/JOSEPHINE-MARIE%20GODWYLL.pdf>.
14. Waziri, B. A. (2024). The Potentials of Geodatabase in the development control Process of the Department of Development Control Abuja Metropolitan Management Council (Doctoral dissertation, AUST).
15. Mika, M., Siejka, M., Leń, P., & Król, Ż. (2018). The concept of using the water cadastre databases components for the construction of multi-dimensional cadastre in Poland. *Survey Review*, 50, 201-211. <https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1263180>.
16. Serra Bellini, L., Spanò, A., Cittadini Bellini, M., & Giulio Tonolo, F. (2024). A heterogenous-source geoinformation system to manage climate-induced modifications on the landscape for sustainable development. *Discover Sustainability*, 5(1), 297. <https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-024-00516-8>.
17. Paulo Escandón-Panchana, Gricelda Herrera-Franco, María Jaya-Montalvo, Sandra Martínez-Cuevas (2024). Review of agricultural cadastre approaches using geomatics for rural development. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 262, 465-478. DOI:10.2495/SDP240391.
18. Law of Ukraine "On Topographic, Geodetic and Cartographic Activities". (2024), Law No. 353-XIV of November 23, 1998 (as amended up to November 27, 2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>.
19. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On Approval of the Procedure for Maintaining the State Land Cadastre". (2024). Resolution No. 1051 of October 17, 2012 (as amended up to August 10, 2024). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-п#Text>.
20. DBN V.1.3-2:2010. Geodetic Works in Construction. (2010). https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199637436816688486?doc_type=2.
21. DSTU 8774:2018. Geographic Information. Rules for Geospatial Data Modeling. (2018). https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78080.

22. Pro zatverdzhennia Poriadku zahalnoderzhavnoho topografichnoho i tematychnoho kartohrafuvannia [On Approval of the Procedure for National Topographic and Thematic Mapping], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No 661 (September 4, 2013). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/661-2013-п#Text>.

23. ISO 19157:2013. Geographic information — Data quality. (2013). <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/32575/cfc99e628ec6449c8a657df4061a0c7b/ISO-19157-2013.pdf>.

24. Pro natsionalnu infrastrukturu heoprosorovykh danykh [On National Geospatial Data Infrastructure Law of Ukraine], Law No. 554-IX of April 13, 2020. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text>.

25. Pro rehuliuivannia mistobudivnoi diialnosti [On Urban Planning Regulation Law of Ukraine], Law No. 3038-VI of February 17, 2011. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text>.

26. Pro Derzhavnyi zemelnyi kadastr [On State Land Cadastre Law of Ukraine], Law No. 3613-VI of July 7, 2011. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17#Text>.

27. Derzhavna sluzhba Ukrainy z pytan heodezii, kartografii ta kadastru [State Service of Ukraine for Geodesy, Cartography and Cadastre]. (2024). <https://land.gov.ua/>.

Отримано 21.12.24

UDC 528.9:711.14:504.06

**Hanna Kireitseva¹, Illia Tsyhanenko-Dziubenko²,
Oleksandr Hnitetskyi³, Svitlana Khomenko⁴**

¹PhD in Economics, Doctoral Student,

Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Protection Technologies
Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: gef_kgv@ztu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1055-1784>

²PhD Student (3rd year) at the Department of Ecology and Environmental Protection Technologies
Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: ke_miyu@ztu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3240-8719>

³PhD Student (2nd year) at the Faculty of Mining, Nature Management, and Construction
Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: hnitetskyi@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-9806-6924>

⁴PhD Student (2nd year) at the Department of Ecology and Environmental Protection Technologies
Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: org_hsv@ztu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-7463-7867>

A COMPREHENSIVE APPROACH TO INTEGRATING WATER PROTECTION ZONES INTO URBAN CADASTRAL GEOINFORMATION SYSTEMS

Relevance of the Research Topic. Modern urbanization processes and increasing anthropogenic pressure on water bodies necessitate the implementation of effective tools for managing water protection zones. The integration of geoinformation technologies into urban cadastral systems creates new opportunities for ensuring sustainable development of urban territories and protection of water resources.

Problem Statement. Existing approaches to representing water protection zones in cadastral systems are characterized by data fragmentation and insufficient compliance with national standards requirements. The lack of a comprehensive approach to ensuring geospatial data quality complicates the process of integrating water protection zones into urban cadastral systems.

Research Aim is to develop a comprehensive approach to integrating water protection zones into urban cadastral geoinformation systems, based on the systematisation of existing methods and analysis of practical experience of the Zhytomyr City Territorial Community.

Main Material. A systematization and comparative analysis of six main approaches for integrating water protection zones into geoinformation systems has been conducted. A program for phased implementation of a water protection zone management system has been developed, taking into account national standards requirements for geospatial data quality. Practical aspects of implementing the proposed solutions have been analyzed using the example of the Zhytomyr City Territorial Community.

Conclusions. The developed comprehensive approach provides a systematic solution to the problem of integrating water protection zones into urban cadastral systems. The proposed program for phased implementation of the geoinformation system creates a foundation for effective management of water protection territories and enhancement of urban environmental sustainability. The research results have practical significance for modernizing cadastral systems and improving urban planning processes.

Keywords: urban cadastral systems, water protection zones, geoinformation technologies, geospatial data quality, territorial community, environmental sustainability.

Fig.: 1. References: 27.

Віктор Васильович Ворох¹, Віталій Іванович Зацерковний²¹ аспірант кафедри геоінформатики

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: fainkucha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0112-8422>² доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геоінформатики

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>. Scopus ID: 57200165109**ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ
В ЗАДАЧАХ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА**

Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в сільському господарстві взагалі, а прецизійному землеробстві зокрема, з кожним роком набуває все більших форм, від посіву насіння, моніторингу їх зростання та врожайності, їх картування до обприскування посівів засобами захисту рослин (ЗЗР) і внесення добрив. В прецизійному землеробстві є можливість інтегрувати геопросторові дані, технології ГІС та ДЗЗ, штучний інтелект, Big Data, Інтернет речей та інші інноваційні рішення.

БПЛА дають можливість оперативно здійснювати моніторинг ґрунтів, аналізувати стан і динаміку посівів, відстежувати проблемні ділянки, які потребують управлінського втручання, оцінювати ефективність тих або інших агротехнічних прийомів, дають можливість доступного одержання фотографічної інформації, знімків високої розрізненості тощо. Сучасні БПЛА є доступними для аграріїв, не тільки надають актуальну інформацію про стан і динаміку зростання рослин, але й захисну обробку полів і багаторічних насаджень пестицидами. Вони дозволяють отримати геоприв'язані дані про стан вирощуваних сільськогосподарських рослин, що істотно допомагає аграріям для одержання високих врожайів. Зокрема, БПЛА, оснащені мультиспектральними і RGB-камерами дають можливість оперативно одержання зображень сільськогосподарських культур в ближній інфрачервоній частині спектра, забезпечуючи при цьому моніторинг стану вегетації та здоров'я рослин. Зйомка з БПЛА є набагато більше деталізованою, на відміну від космічних знімків, розрізнення можливе навіть в сантиметрах на точку, за рахунок висот польоту від 100 до 600 метрів над поверхнею землі.

Описано використання БПЛА для прецизійного землеробства. Розглянуто методи моніторингу полів за допомогою БПЛА. Впровадження технологій зйомки з БПЛА дозволяє створювати електронні карти полів і оперативно приймати управлінські рішення при ускладненні ситуації. Індекс NDVI, що отримується за допомогою БПЛА більш повно і детально відбиває поточну ситуацію на кожній ділянці поля, чого важко досягти за допомогою супутникової зйомки.

Визначено, що наша країна має потенціал до використання БПЛА в сільському господарстві з огляду на технічні, економічні та людські ресурси.

Ключові слова: прецизійне землеробство; моніторинг; цифрове сільське господарство; дистанційне зондування, засоби захисту рослин (ЗЗР), пестициди, БПЛА, підвищення врожайності.

Рис.: 13. Бібл.: 15.

Постановка проблеми. Сільськогосподарська галузь для більшості держав світу завжди була і залишається однією з пріоритетних сфер як зовнішньоекономічного, так і внутрішньоекономічного розвитку. Від неї залежить не тільки життєздатність і самодостатність країн і суспільства, а й безліч інших напрямів людської діяльності. Не є виключенням у цьому й Україна, яка за короткий проміжок часу з країни, що займалася виробництвом зерна головним чином для власних потреб, перетворилася на одного зі світових лідерів з експорту зерна, соняшникової олії, а продукцію з наших ланів можна зустріти по всьому світу. Саме ця галузь сьогодні забезпечує 14 % ВВП України і є впевненість, що ці тенденції збережуться і надалі будуть зростати, незважаючи на надзвичайно складну ситуацію в країні.

Визначаючи солідні успіхи сучасного сільського господарства України, потрібно відзначити однак, що ця галузь має і великі проблеми як економічного характеру, так і проблеми, пов'язані із продуктивністю і рентабельністю, зростаючим дефіцитом робочої сили викликаних війною та депопуляцією сільських територій (незадовільними економічними та соціальними умовами, подальшим зростанням безробіття, активізацією міграційних процесів (урбанізацією міст) і як наслідок, вимиранням села), деградацією навколишнього природного середовища (НПС), зростаючим трендом споживання тваринних білків, зміну харчових переваг через старіння населення, глобальним потеплінням клі-

мату тощо [1; 2]. До цих проблем додається необхідність точної ідентифікації та кількісної оцінки патогенних факторів, які впливають як на здоров'я рослин, так і тварин і як наслідок становлять ризик здоров'ю людини. Також є залежність врожаю на 80% від природно-погодних умов [3].

При застосуванні технологій прецизійного землеробства (No-till, Strip-till), сільськогосподарських установок з цифровим керуванням, БПЛА тощо, вплив погоди і клімату на ефективність рослинництва зводиться до 20 %, а решта, 80 %, припадає на технології та управління у сільському господарстві [3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Посиленням глобалізації світової економіки і зростання населення земної кулі демонструє важливість прогресу сільського господарства, який визначає не тільки рівень життя населення, але й відіграє ключову роль у забезпеченості економіки будь-якої країни.

За свідченням науковців, наприклад [4], населення світу у 2050 році досягне цифри 10 мільярдів осіб. Щоб прогодувати таку кількість людей потрібно збільшити виробництво продуктів харчування щонайменше на 70 %. При цьому можливості збільшення площ орних земель у світі реально відсутні. Це означає, що для подальшого прогресу сільськогосподарської галузі є жорстка потреба кардинальних інноваційних змін, заснованих перед усім на впровадженні спеціальних агровиробничих процесів, інформаційних і геоінформаційних технологій, технологій ДЗЗ та GPS ряду інших інноваційних наукових і науководослідних досягнень, спрямованих на підвищення врожайності та якості сільськогосподарського виробництва.

Прикладом таких технологій можуть слугувати технології прецизійного землеробства, які з кожним роком набувають все більшої популярності. Це пов'язано з тим, що ці технології дозволяють отримувати оптимальну продуктивність з кожного поля, зменшити витрати та забезпечувати екологічну стійкість та захист природного середовища. У центрі прецизійного (точного, «розумного») землеробства знаходяться сільськогосподарські роботи, серед яких широке застосування одержали БПЛА [5; 6; 7], які дозволяють аналізувати стан ґрунтів, посівів, ефективність застосування ЗЗР, вологість тощо.

Відсутність або неповнота знань про стан ґрунтів і посівів, погодні умови, неправильне або неповне використання потенціалу засобів ЗЗР, проблеми зрошення, помилки в оцінці майбутнього врожаю та відсутність або недостатність інформації про ринкові тенденції слугують причиною втрат і додаткових збитків аграріїв. Застосування технологій прецизійного землеробства дозволяє позбутися більшості з цих проблем. Ці технології дозволяють отримувати оптимальну продуктивність з кожного поля, зменшити витрати та забезпечувати екологічну стійкість та захист природного середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням розвитку аграрної галузі присвячені праці вчених В. Амбросова, С. Володіна, А. Гайдуцького, О. Дація, М. Зубця, М. Кісіля, М. Маліка, В. Месель-Веселяка, Г. Підлісецького, П. Саблука, В. Юрчишина та ряду інших.

Питанням застосування БПЛА у сільському господарстві займалися вчені Д. С. Буллок (Bullock D.S.), А. П. Малларіно (Mallarino A.P.), П. К. Шарф (Scharf P.C.), В. М. Глотов, А. Гуніна, М. П. Магійчик, В. П. Харченко, О. А. Цимбалістова, Г. М. Юн та ін. Незважаючи на великий внесок цих учених у перспективний розвиток сучасного сільського господарства, впровадження інноваційних технологій застосування БПЛА в технології прецизійного землеробства, є ще багато проблемних питань, які потребують свого освітлення.

Метою статті є аналіз можливостей застосування БПЛА в технологіях прецизійного землеробства для підвищення врожайності рослинництва та збільшення його прибутковості.

Виклад основного матеріалу. Етапи розвитку аграрного сектору у світі з ХІХ–ХХІ ст. представлені на рис. 1.

ЕТАПИ РОЗВИТКУ АГРАРНОГО СЕКТОРУ В СВІТІ

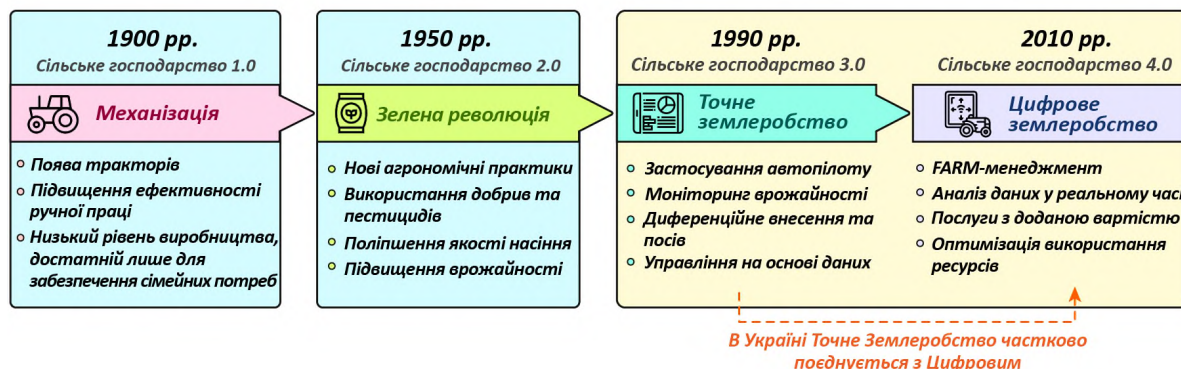


Рис. 1. Етапи розвитку аграрного сектору у світі

Першим етапом розвитку аграрного сектору у світі стало впровадження засобів механізації процесів вирощування зернових, перед усім тракторів і комбайнів, що спричинило укрупнення невеличких сільськогосподарських господарств, збільшення площ. У деяких господарствах оброблювані площі досягли кілька тисяч гектарів. Застосування засобів механізації дало можливість повністю позбутися важкої ручної праці, особливо під час збирання врожаю.

Другим етапом став етап так званої «зеленої революції», яка спричинила появу нових агрономічних практик, комплексного використання мінеральних добрив, хімічних засобів боротьби з бур'янами і шкідниками, що викликали більш трудомісткі виробничі процеси, які доцільно проводити на великих площах. Це дало можливість суттєво підвищити (на 30-60 %) врожайність полів. Проте при цьому, чим більшими ставали окремі поля, тим менше знань аграрії мали про кожне поле і окремі його ділянки.

Технології прецизійного землеробства дозволяють отримувати оптимальну продуктивність з кожного поля, зменшити витрати та забезпечувати екологічну стійкість та захист природного середовища.

Прецизійне землеробство – це управління урожайністю посівів із врахуванням внутрішньопольової варіабельності місця існування рослини за допомогою сучасних технологій геоінформаційних систем (ГІС), дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), Інтернету речей (IoT), великих масивів даних (Big Date), штучного інтелекту (ШІ), хмарних обчислень, машинного навчання тощо спрямованих на збільшення сільськогосподарського виробництва та мінімізації витрат ресурсів (рис. 2).

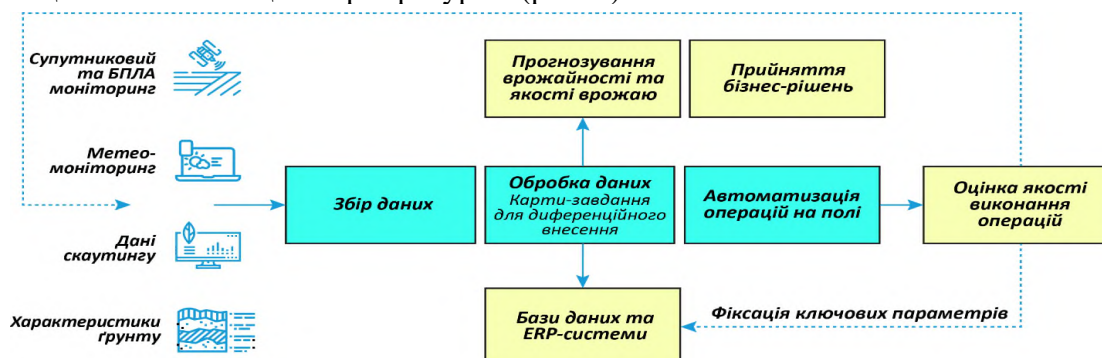


Рис. 2. Приклад застосування технологій прецизійного землеробства

Надмірне та/або неефективне використання природних ресурсів, перед усім ґрунту і води, добрив та пестицидів для сільськогосподарського виробництва при класичному землеробстві спричиняє збільшення втрат води та поживних речовин і, як наслідок, спричинює деградацію НПС [8].

Очікувані результати від впровадження системи прецизійного землеробства представлені на рис. 3.

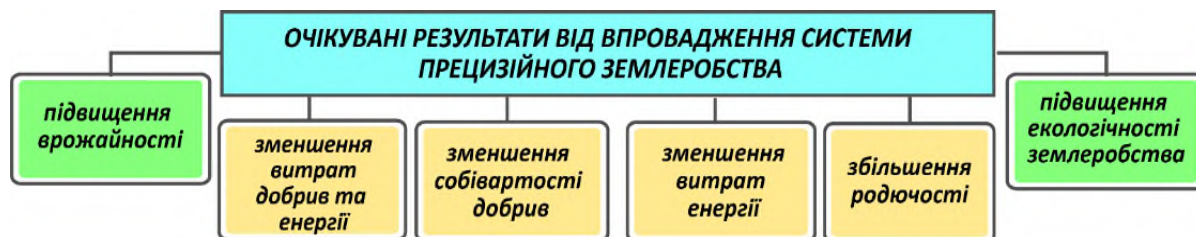


Рис. 3. Очікувані результати від впровадження системи прецизійного землеробства

Для впровадження системи прецизійного землеробства потрібні складові, що представлені на рис. 4.

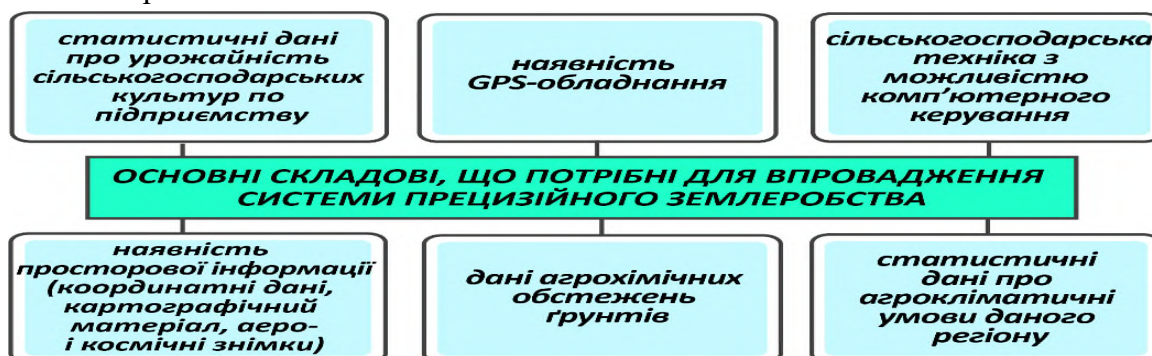


Рис. 4. Основні складові, що потрібні для впровадження системи прецизійного землеробства

Використовуючи ці дані і засоби дані фахівці мають можливість ефективно реагувати на увесь спектр різноманітних умов що виникають в процесі сільськогосподарського виробництва.

Алгоритм виробництва сільськогосподарської продукції на основі технологій прецизійного землеробства представлений на рис. 5.

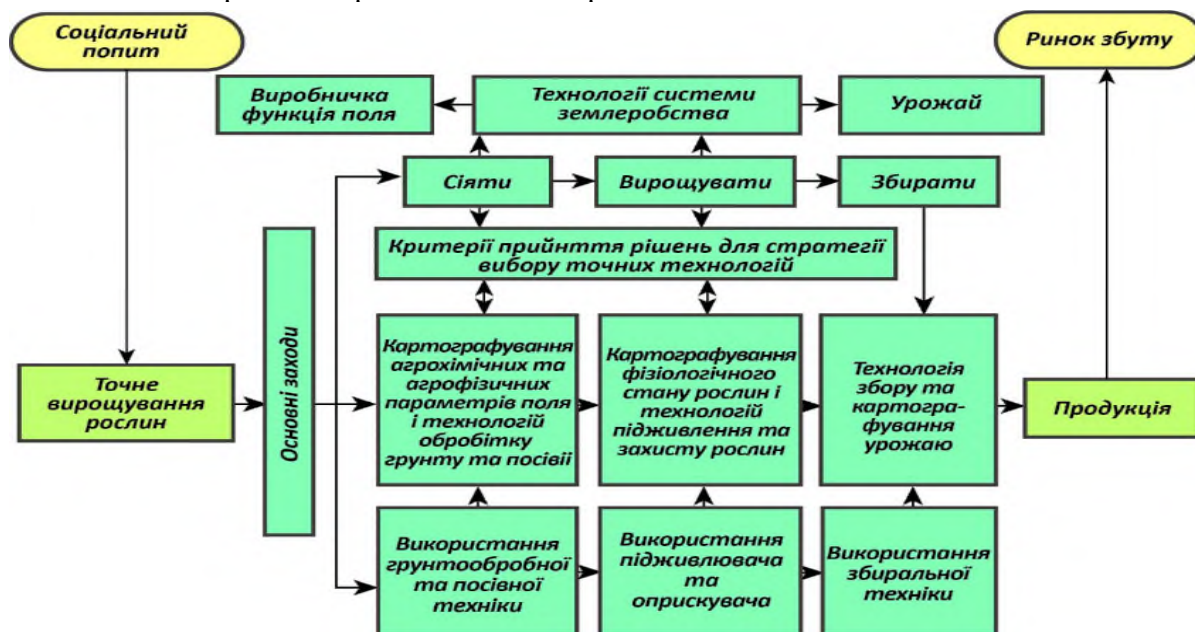


Рис. 5. Алгоритм виробництва сільськогосподарської продукції на основі технологій прецизійного землеробства

Для одержання високих врожаїв аграріям потрібно протягом сезону постійно здійснювати моніторинг схожості посівів, їхнє зростання і дозрівання незалежно від часу і погоди, наявності бур'янів, шкідників, хвороб рослин тощо в умовах постійного підвищення вимог до якості сільськогосподарської продукції.

В основі наукової концепції прецизійного землеробства лежить поняття про існування неоднорідностей в межах одного поля (рис. 6).

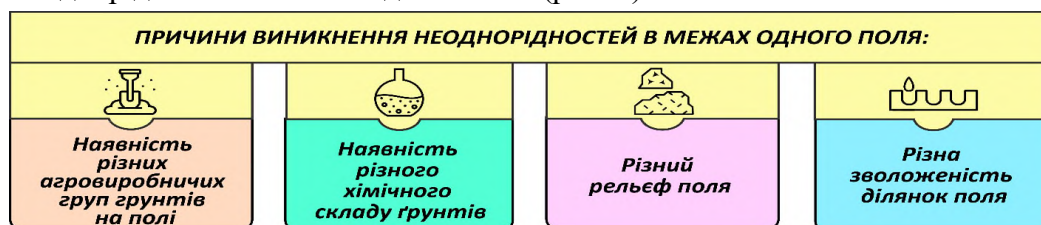


Рис. 6. Причини виникнення неоднорідностей в межах одного поля

Класичне сільське господарство оперує на рівні поля, незважаючи на різні властивості ґрунту по полю, його родючості, розмаїття за генезисом, гранулометриєю та зволоженням. Прецизійне ж землеробство спрямовує зусилля аграріїв реально на управління кожним квадратом поля, дозволяє сільськогосподарським рослинам точно отримати саме те і саме в тій кількості що їм необхідно. Це дає змогу оптимізувати витрати на виробництво аграрної продукції по меншій мірі без втрати врожайності.

Технології змінного або диференційованого внесення добрив здійснюються на підставі електронних карт полів, космічних знімків, аналізу стану ґрунтів, тощо. При диференційному внесенні середня норма внесення, в розрахунку на один гектар, суттєво зменшується. При цьому відбувається перерозподіл добрив на користь ділянок, які цього потребують, і тим самим, оптимізується внесення добрив.

Напрямки поліпшення полів представлені на рис. 7.

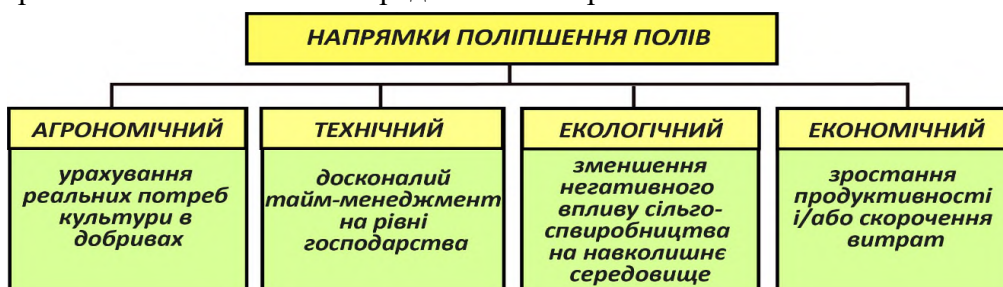


Рис. 7. Напрямки поліпшення полів

У центрі прецизійного (розумного) землеробства знаходяться сільськогосподарські роботи, серед яких широке застосування одержали БПЛА [5; 6; 7].

Сьогоднішні сільськогосподарські БПЛА мають високу надійність, стабільність роботи та високу продуктивність. При цьому БПЛА не тільки дешевше більшості інших сільськогосподарських машин, але й значно простіше в управлінні.

Постійне удосконалення БПЛА сприяло розширенню можливостей застосування БПЛА в різних сферах сільського господарства. Це застосування пестицидів і добрив, обприскування ЗЗР, посадка насіння, пошук і розпізнавання бур'янів, оцінка родючості ґрунтів, картографування та прогнозування врожаїв, охорона полів тощо [9].

Сучасні технології БПЛА та лазерного сканування дозволяють у максимально короткі терміни проводити крупномасштабні знімання і отримувати у цифровому вигляді ортофотоплани та цифрові моделі місцевості. Водночас є й свої проблеми, які пов'язані із природними та погодними умовами, неможливістю здійснювати зйомку великих територій тощо.

Середня вартість звичайного БПЛА починається з 1300 євро. Вартість БПЛА для АПК без спеціальних технологій коливаються від 2000 до 3000 євро. Технологічні БПЛА, які використовуються для спеціальних операцій, починаються з 8000 євро, деякі моделі – з 30 000 євро (БПЛА-обприскувачі і БПЛА оснащені спеціальними гіперспектральними камерами та іншим коштовним обладнанням) [10].

Застосування БПЛА в технологіях прецизійного землеробства дозволяє революційним чином змінити сільське господарство, вирішити цілу низку проблем, з якими стикається сучасне аграрне виробництво, швидко збирати й опрацьовувати дані, дозволяючи сільському господарству стати високотехнологічною галуззю, засновану на точних розрахунках.

Це пояснюється тим, що, по-перше, використання та експлуатація БПЛА в сільському господарстві на порядок дешевша від використання пілотованих літальних апаратів, які потребують доволі коштовної спеціальної підготовки пілотів, оснащення системами життєзабезпечення, захисту, кондиціонування тощо. По-друге, БПЛА потребують значно менше традиційних паливно-мастильних матеріалів (ПММ) і в майбутньому можуть використовувати альтернативне (відновлюване) паливо. По-третє, БПЛА не потребують аеродромної інфраструктури, а можуть працювати з невеличких ґрунтових площадок, особливо це стосується квадрокоптерів. По-четверте, з кожним роком дешевшає «начинка» БПЛА, вони стають більш мініатюрними, компактними і більш «розумними», зростають їх функціональні можливості.

Використання БПЛА дає можливість аграріям здійснювати регулярну аерозйомку полів своїх господарств, виконувати їх точні заміри, створювати картографічні матеріали у тому числі і тривимірні, контролювати стан ґрунту, якість оранки й посіву, збирати дані для розрахунку вегетаційних індексів, будувати електронні карти, доповнювати дані, одержані за допомогою сучасної сільськогосподарської техніки, супутників, прогнозувати врожай, захищати ділянки від пожеж, розкрадань, поїдання продукції дикими тваринами, «точково» поліпшувати стан ґрунту, вносячи мікродобрива, засоби захисту рослин (ЗЗР), які призначені для боротьби з хворобами рослин та різного роду шкідниками – бур'янами, комахами, гризунами, визначення рівня забруднення, контролювати тварин тощо.

Завдання, що вирішуються сучасними БПЛА представлені на рис. 8.

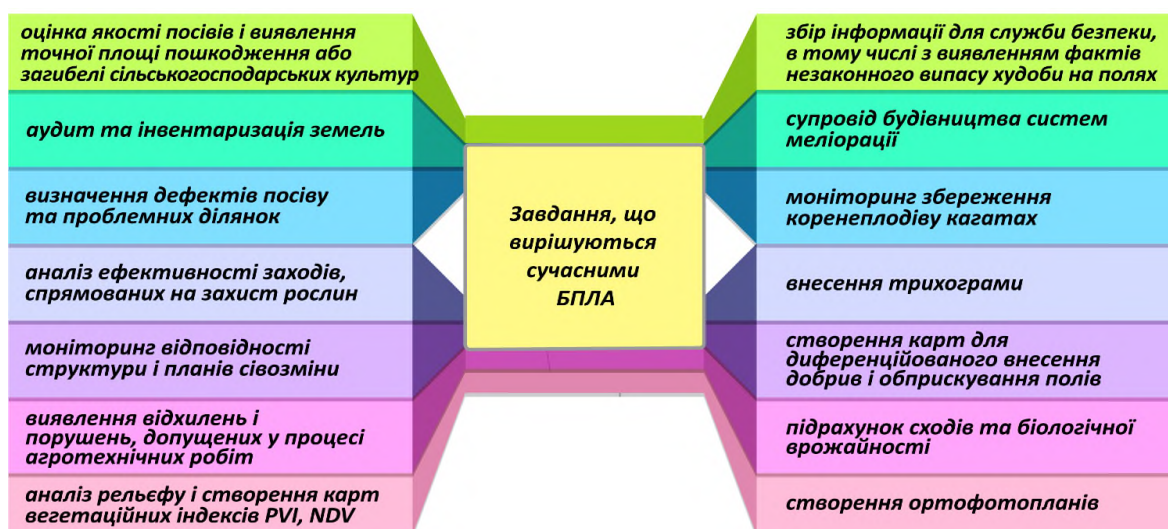


Рис. 8. Завдання, що вирішуються сучасними БПЛА

Спектр технологічних операцій прецизійного землеробства які на сьогодні вже впроваджені в сільське господарство за допомогою БПЛА є доволі широким (рис. 9).

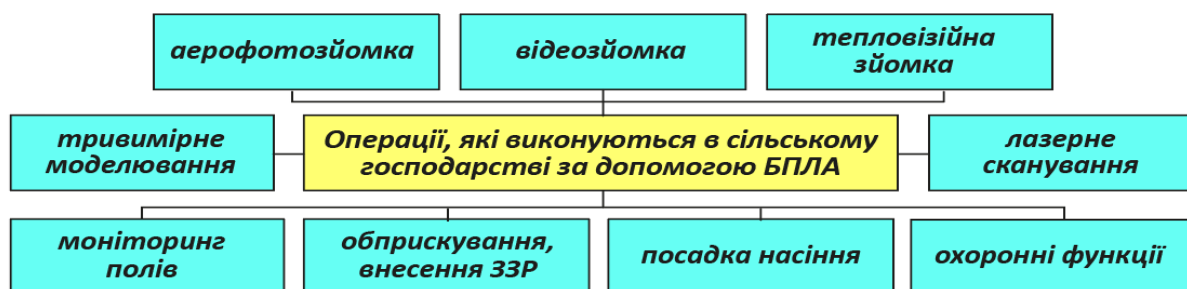


Рис. 9. Операції, що виконуються за допомогою БПЛА [11-14]

Аерофотозйомка за допомогою БПЛА істотно перевищує можливості зйомки із супутників за рахунок високої актуальності, високої розрізненості за рахунок низької висоти польоту навіть в умовах поривчастого вітру і хмарності тощо. Виконується аерофотозйомка для виявлення прогалів на полях, загибелі врожаю (насаджень) через вплив природних факторів або військових дій, які потребують оперативного втручання та усунення, створення тривимірних карт, посів насіння, внесення добрив і хімікатів, моніторингу посівів, для проведення іригації, моніторингу тварин і шкідників тощо.

Крім того, перед керівниками і агрономами завжди стояла проблема перегляду і оцінки того що твориться в середині великих полів, оскільки на жаль є певна частина недобросовісних людей, які не тільки крадуть частину врожаю, але й часом підсіюють на полі свої культури. І виявити ці проблемні ділянки в середині кукурудзяного або соняшникового полів без БПЛА майже неможливо. За необхідності апаратура БПЛА може налаштуватися таким чином, щоб дані надходили в режимі реального часу, здійснювати зміну маршруту польоту для отримання додаткових або уточнюючих даних залежно від обстановки тощо.

Аерофотозйомка за допомогою БПЛА дозволяє одержати карту висот – плоску карту, що показує рельєф поля. На такій карті перепади рівня поверхні позначені кольорами, як на звичній геофізичній карті (гори коричневі, а низини зелені). Крім кольорового кодування на карту рельєфу наносяться ізолінії, що з’єднують точки одного рівня (рис. 10).

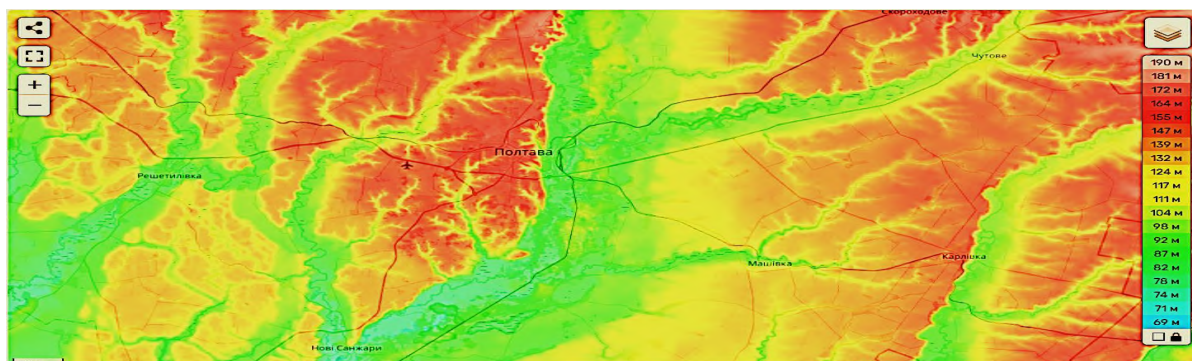


Рис. 10. Приклади карт висот

Примітка. Для роботи з рельєфом дуже зручно, коли висоти в метрах нанесені разом з ізолініями. Таке маркування може допомогти виявити проблемні місця на полях.

Відеозйомка суттєво зменшує фінансові і часові витрати на актуальний моніторинг полів порівняно з використанням наземної техніки, дозволяючи обстежувати до 30 км²/годину.

Мультиспектральна зйомка є дуже необхідним елементом прецизійного землеробства, оскільки характеристики кожного поля є неоднорідними й можуть сильно варіюватися від ділянки до ділянки змінюючи відповідним чином урожайність. Факторів цього доволі

багато і спрогнозувати їх на певну культуру та ще з урахуванням впливу погодних умов доволі складно. По-перше, це рельєф поля, який може впливати на освітленість цього поля (одні схили повернені до сонця, інші затінені). По-друге, різний мінеральний склад. По-третє, різна вологість ґрунту. По-четверте, різна кількість бур'янів та нашествия шкідників по ділянках тощо. Тобто, має місце певна мозаїчність поля за характеристиками. Можливі різні підходи щодо вирішення цієї проблеми. Можна не звертати уваги на цю мозаїчність, а сподіватись на середній врожай на полі. Можна додатково підживлювати рослини на ділянках з малим рівнем поживних елементів. Можна навпаки витратити менше насіння і добрив на потенційно слабкі і безперспективні ділянки і збільшити їх дозування на потенційно сильні ділянки намагаючись зменшити фінансові витрати по полю і збільшити загальну врожайність. Врешті-решт можна поміняти сільськогосподарську культуру.

Остаточне правильне і ефективне рішення можна прийняти для конкретної ситуації за допомогою кількісних даних, отриманих за результатами обробки мультиспектральної зйомки з БПЛА. Використовуючи ці дані можна провести зонування поля за різними показниками, наприклад, рівнем стресу у рослин, вегетативною масою, розподілом питомого вмісту хлорофілу по полю, рівню забур'янення та їх локалізацією і виробити правильні стратегії щодо подальшого ведення цього поля. Використовуючи ці дані, можна прийняти конкретне рішення щодо обробки поля гербіцидами (виконати доволі кошову рівномірну заливку поля колісним оприскувачем, або вносити гербіциди диференційовано, зменшуючи витрати препарату, але збільшуючи вартість внесення, або використати БПЛА для диференційного внесення гербіцидів, уникаючи при цьому витоптування поля, механічного контакту з рослинами, стресу рослин від контакту з гарячими частинами оприскувача).

Тривимірне моделювання дозволяє створювати точні 3D-карти, які можна використовувати для планування карт-завдань на посів, виконувати аналіз вегетації, надаючи дані для іригації та рівнем управління азотом [3], визначати перезволожені або засушливі території, виконувати виїмку ґрунту, створювати ефективні плани і карти зволоження, осушення (меліорації) земельних угідь, рекультивації ґрунтів тощо.

Тепловізійна зйомка виконується в ближньому, середньому і дальньому діапазоні й дає можливість визначати терміни диференціювання точок росту, безпосередньо впливає на врожайність і збереження продуктивних властивостей рослин зі збереженням спадкових можливостей сорту.

БПЛА з тепловізорами спроможні здійснювати зйомку і ніччю, виявляти при цьому сторонню техніку, людей і тварин, дистанційно виявляти осередки пожеж.

Лазерне сканування застосовується головним чином для аналізу місцевості на важкодоступних недоступних територіях і забезпечує одержання точної моделі високої щільності з детальним відображенням рельєфу навіть в умовах сильної загущеності рослин, чагарників та дерев.

Обприскування використовується для точного точкового обприскування рослин і плодкових дерев, що потребують захисту і виключають потрапляння засобів хімічного захисту на рослини і дерева, які їх не потребують, мінімізують контакт працівників з препаратом. Здійснюється за рахунок дооснащення БПЛА спеціальними приладами. При цьому вартість аерообприскувача в середньому на порядок менше порівняно з наземним самохідним обприскувачом аналогічної продуктивності.

Провідними технологіями застосування БПЛА в прецизійному сільському господарстві на сьогодні слугують точне позиціонування, навігація, засоби управління, візуалізація, зв'язок, сенсори, матеріали, акумуляторні батареї, двигуни. Залежно від призначення БПЛА додаються технології розробки обладнання, керування форсунками обприскувача тощо. Деякі з цих технологій представлені на рис. 11.



Рис. 11. Застосування технологій прецизійного (розумного) для сільського господарства

При виборі БПЛА необхідно врахувати різні характеристики, перед усім щодо їх продуктивності (зона покриття за одиницю часу), автономності (час польоту без перерви для дозаправки або підзарядки) і вантажопідйомності (корисний вантаж, що підлягає транспортуванню). Класифікація БПЛА представлена на рис. 12.

Кожен аграрій прагне одержати якомога більший прибуток, що залежить від врожайності поля та при мінімізації своїх витрат. Для цього потрібно здійснювати моніторинг полів. Проте, людина, навіть з неабиякими здібностями, неспроможна здійснити якісний моніторинг полів, оцінити схожість посівів, ураження рослин різними хворобами або шкідниками, протидію шахрайству тощо. Застосування ж БПЛА надають аграріям неабиякі можливості, а саме визначити щільність рослинності, виявляти наявність бур'янів, створювати стрес-карти визначати рівень вегетації, визначати потенціал урожайності розраховувати різні індекси тощо. БПЛА, облітає поля, збирає дані у вигляді знімків або виконує відеозйомку. Ці дані дозволяють створювати точні карти поля, у тому числі і зміни рельєфу, які є дуже корисними для визначення моделей дренажу, визначення вологих або сухих ділянок поля та застосовувати більш ефективні методи поливу.

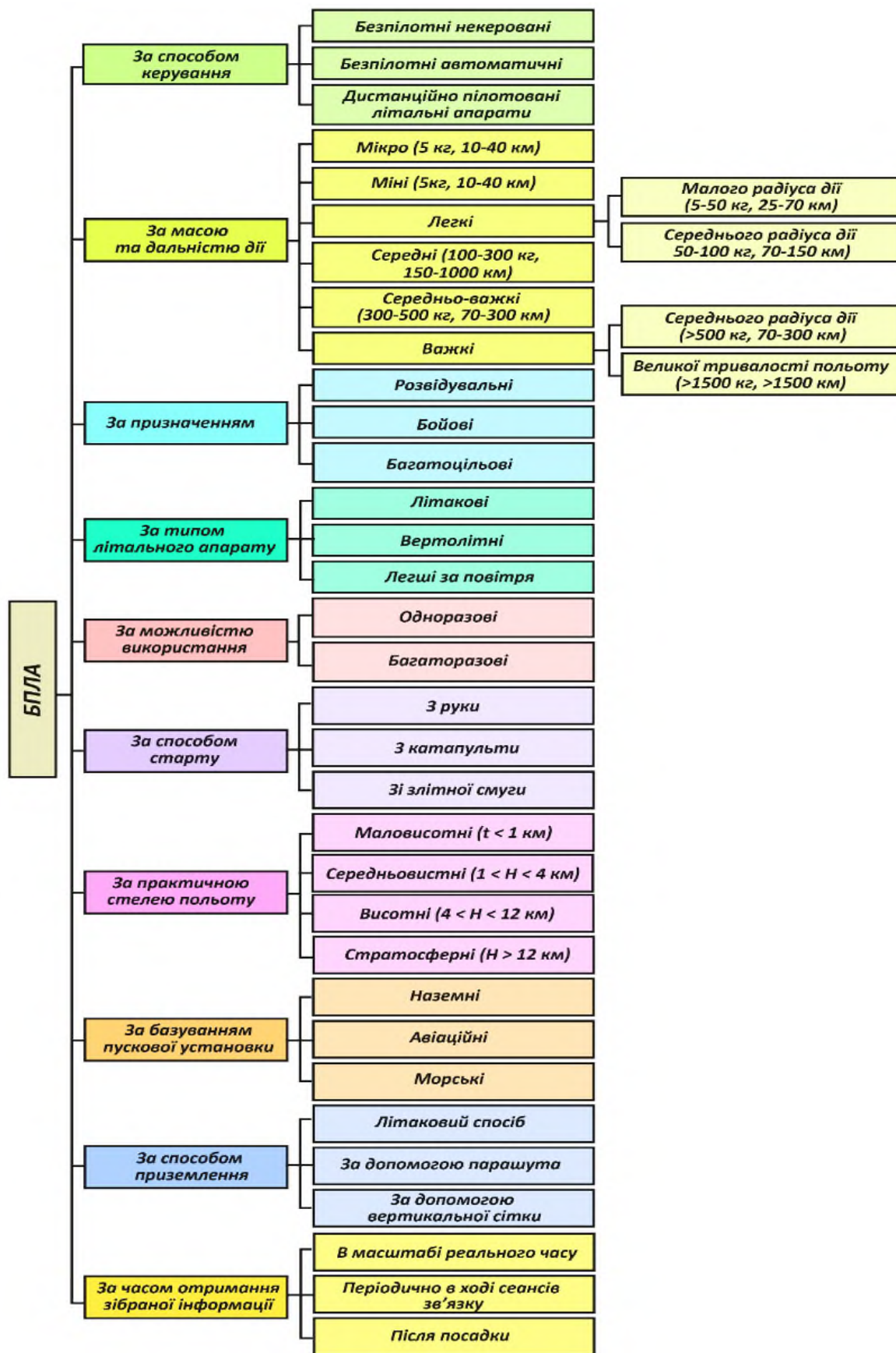
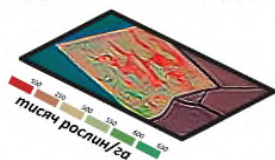


Рис. 12. Класифікація БПЛА [15]

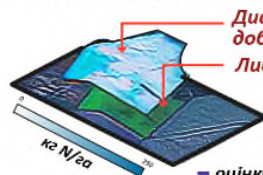
Сучасні БПЛА можуть навіть здійснювати моніторинг рівень азоту в ґрунті, що дозволяє точно вносити добрива або ЗЗР, покращуючи стан ґрунту (рис. 13).

ПІДРАХУНОК СХОДІВ



- підрахунок кожної рослини в полі;
- незалежна від людського фактору аналітика;
- оцінка агротехнології посіву, технічного стану сівалок та втрат урожаю;

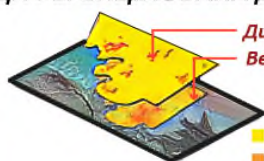
ДИФЕРЕНЦІЙОВАНЕ ВНЕСЕННЯ АЗОТНИХ ДОБРИВ



Диференційоване внесення азотних добрив
Листковий індекс (GAI)

- оцінка нерівномірності розвитку рослин;
- раціональне внесення азотних добрив;
- внесення добрив під заплановану врожайність;

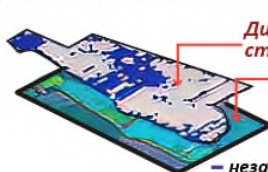
ДИФЕРЕНЦІЙОВАНА ДЕСИКАЦІЯ



■ десикація не потрібна
■ десикація необхідна

- економія ЗЗР;
- мінімізація втрат при збиранні врожаю;
- зменшення втрат на доопрацювання на елеваторі;

ДИФЕРЕНЦІЙОВАНЕ ВНЕСЕННЯ СТРАХОВОГО ГЕБРІЦИДУ



Диференційоване внесення страхового гербіциду
Забур'яненість у міжряддях

■ низька норма
■ висока норма

- незалежна від людського фактору аналітика;
- економія ЗЗР та зменшення стресу для культурних рослин;
- локалізація забур'яненості для подальшого визначення видового складу;

Рис. 13. Основні переваги застосування БПЛА в моніторингу полів

Джерело: розроблено авторами.

Є доступні інноваційні платформи, де всім наявним для аналізу інструментарієм можна одночасно користуватися з єдиної панелі управління. Платформа використовує унікальні алгоритми машинного навчання і штучного інтелекту для обробки знімків. Користувач одержує інформацію у вигляді широкого переліку векторних карт з функцією перегляду на панелі. Інформація надається у вигляді sharerfile, яка прив'язана до системи координат, що значно полегшує наступне диференційне добрив, ЗЗР або десикантів. На екрані монітора дані відображаються у вигляді різнокольорових шарів ГІС (дані сенсорів і стану розвитку рослин, забур'яненості окремих ділянок поля, ураження шкідниками, прогноз погоди, поточні задачі, дані різного роду перевірок, знімки з різними індексами вегетації: NDVI, ENDVI, GNDVI, OSAVI, ARI, SIWSI, WDRVI, VARI700 тощо.

Управління БПЛА здійснюється вручну за допомогою радіомодема, який через антенну з наземної станції управління (пульта управління) отримує сигнал із заданими параметрами руху (швидкість і кути) і передає їх на польотний контролер.

Необхідними складовими комплексу наземної станції управління є комп'ютер з виходом в інтернет або з 4G-модемом для автономного управління БПЛА і пульт управління (планшет або мобільний пристрій) – для дистанційно-ручного. За допомогою комп'ютера виконується обробка відео з БПЛА, розрізнення перешкод та інших об'єктів спостереження, а також корегування маршруту польоту.

Керування БПЛА здійснюється за допомогою спеціальних додатків, які дають можливість планувати складні польотні завдання за допомогою декількох кліків. У заданих точках маршруту додаток автоматично виконає фотозйомку для одержання точних карт місцевості або виконає відеозйомку за зазначеним маршрутом. Крім того, додатки мають функції, які не дозволяють БПЛА летіти вище і швидше запрограмованих параметрів, підвищуючи тим самим безпеку польоту і полегшуючи процес управління БПЛА.

Моніторинг посівних площ це доволі трудомісткий процес, який вимагає багато часу, як для великих полів, так і для маленьких сільськогосподарських ділянок, розкиданих по території громад. Він дозволяє своєчасно виявляти відхилення в рості і розвитку рослин, визначити їх причини і приймати оперативні і ефективні управлінські рішення щодо покращення ситуації. Якщо посіви молоді і невеличкі, то можна пройтись або проїхатись по полю, але якщо рослини досягли висоти 1-2 метри, то це вже зробити доволі складно. А відсутність інформації по всій площі поля – це зазвичай потенційні збитки.

Висновки. Прецизійне землеробство дозволяє підвищити ефективність сільського господарства, зменшити екологічні ризики в агроєкосистемах, більш ощадно та раціонально використовувати матеріально-технічні ресурси.

Використання технологій прецизійного землеробства неможливе без вивчення неоднорідностей поля. Це потребує широкого використання технологій ДЗЗ, а саме знімків із супутників та БПЛА.

Застосування БПЛА дозволяє не тільки отримати аерофотознімки високого розрізнення для подальшого аналізу рослинного покриву, а й розв'язати цілий комплекс інших сільськогосподарських задач.

Україна все ширше використовує ці інновації навіть в умовах російської агресії. Незважаючи на сьогоденні обмеження на використання повітряного простору (одержання дозволів та узгоджень з військовими частинами, дозволів на польоти та офіційних наказів Міністерства Оборони), сільськогосподарські БПЛА все більше задіюються для виконання певних циклів агротехнічних робіт.

Список використаних джерел

1. Gnip, P. Analysis of external drivers for agriculture / P. Gnip, K. Charvat, M. Krocan // World Conference on Agricultural Information and IT, LAAID AFITA WCCA, 2008. – Pp. 797-801.
2. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen / S. R. Carpenter, N. F. Caraco, D. L. Correll, R. W. Howarth, A. N. Sharpley, V. H. Smith // Ecological Applications. – 1998. – № 8(3). – Pp.559-568.
3. A review on the use of drones for precision agriculture / P. Daponte, L. De Vito, L. Glielmo, L. Iannelli, D. Liuzza, F. Picariello, G. Silano // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. – Vol. 275, 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/275/1/012022>
4. Agriculture in 2050: Recalibrating targets for sustainable intensification / M. C. Hunter, R. G. Smith, M. E. Schipanski, L. W. Atwood, D. A. Mortensen // Bioscience. – 2017. – № 67(4). – Pp. 386-391.
5. Ju C. Discrete event systems-based modeling for agricultural multiple unmanned aerial vehicles: Automata theory approach / C. Ju, H. I. Son // 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), PyeongChang, 20 October 2018. – 2018. – Pp. 258-260.
6. Muchiri, N. A review of applications and potential applications of UAV / N. Muchiri, S. Kimathi // Proceedings of Sustainable Research and Innovation Conference. – 2016. – Pp. 280-283.
7. Kim, W. J. TOA-based localization algorithm for mitigating positioning error in NLOS channel / W. J. Kim, J.-H. Kang // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. – 2018. – № 24(11), – Pp. 1043-1047.
8. Economic and environmental consequences of overfertilization under extreme weather conditions / G. S. Hendricks, S. Shukla, F. M. Roka, R. P. Sishodia, T. A. Obreza, G. J. Hochmuth, J. Colee // Journal of Soil and Water Conservation. – 2019. – № 74(2). – Pp. 160-171.
9. Mogili, U. R. Review on application of drone systems in precision agriculture / U. R. Mogili, B. Deepak // Procedia Computer Science. – 2018. – № 133. – Pp. 502-509.
10. Остапенко, В. Технології майбутнього: дрони в сільському господарстві [Електронний ресурс] / Вадим Остапенко // Agravery.com – Режим доступу: <https://agravery.com/uk/posts/author/show?slug=tehnologii-majbutnogo-droni-v-silskomu-gospodarstvi>.
11. Дрони на службі в агрономів. [Електронний ресурс] // ТОВ "ТД ІРБІС" постачальник промислових комплектуючих. – Режим доступу: <https://www.irbis.ua/news/novosti-o-kompanii/agro-drony>.

12. Можливості застосування БПЛА в рослинництві: де агроному знадобляться дрони [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://superagronom.com/articles/580-mojlivosti-zastosuvannya-bpla-v-roslinnitstvi-de-agronomu-znadoblyatsya-droni>.

13. Станкевич, С. В. Безпілотні літальні апарати у сільському господарстві: переваги і недоліки [Електронний ресурс] / С. В. Станкевич. – Режим доступу: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/31820/1/zbior_prac_naukowych_tom_4-86-90.pdf.

14. Mazur, M. Clarity from above: PwC global report on the commercial applications of drone technology / M. Mazur, A. Wisniewski, J. McMillan. – Warsaw: Drone Powered Solutions, Price Waterhouse Coopers, 2016.

15. Глотов, В. Аналіз можливостей застосування безпілотних літальних апаратів для аерознімальних процесів / В. Глотов, А. Гуніна // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2014. – № 2(28). – С. 65-77.

References

1. Gnip, P., Charvat, K., & Krocan, M. (2008). *Analysis of external drivers for agriculture. World Conference on Agricultural Information and IT, LAAID AFITA WCCA*, 797–801.

2. Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), 559–568.

3. A review on the use of drones for precision agriculture. (2019). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 275, 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/275/1/012022>.

4. Hunter, M. C., Smith, R. G., Schipanski, M. E., Atwood, L. W., & Mortensen, D. A. (2017). Agriculture in 2050: Recalibrating targets for sustainable intensification. *Bioscience*, 67(4), 386–391.

5. Ju, C., & Son, H. I. (2018). Discrete event systems-based modeling for agricultural multiple unmanned aerial vehicles: Automata theory approach. *2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 258–260. IEEE.

6. Muchiri, N., & Kimathi, S. (2016). A review of applications and potential applications of UAV. *Proceedings of Sustainable Research and Innovation Conference*, 280–283.

7. Kim, W. J., & Kang, J.-H. (2018). TOA-based localization algorithm for mitigating positioning error in NLOS channel. *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 24(11), 1043–1047.

8. Hendricks, G. S., Shukla, S., Roka, F. M., Sishodia, R. P., Obreza, T. A., Hochmuth, G. J., & Colee, J. (2019). Economic and environmental consequences of overfertilization under extreme weather conditions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(2), 160–171.

9. Mogili, U. R., & Deepak, B. (2018). Review on application of drone systems in precision agriculture. *Procedia Computer Science*, 133, 502–509.

10. Ostapenko, V. (n.d.). Future technologies: Drones in agriculture. <https://agravery.com/uk/posts/author/show?slug=tehnologii-majbutnogo-droni-v-silskomu-gospodarstvi>.

11. Drones in the service of agronomists. (n.d.). <https://www.irbis.ua/news/novosti-o-kompanii/agro-drony>.

12. Potential applications of UAVs in crop production: Where drones are needed by agronomists. (n.d.). <https://superagronom.com/articles/580-mojlivosti-zastosuvannya-bpla-v-roslinnitstvi-de-agronomu-znadoblyatsya-droni>.

13. Stankevich, S.V. (n.d.). Unmanned aerial vehicles in agriculture: Advantages and disadvantages. https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/31820/1/zbior_prac_naukowych_tom_4-86-90.pdf.

14. Mazur, M., Wisniewski, A., & McMillan, J. (2016). Clarity from above: PwC global report on the commercial applications of drone technology. Warsaw: Drone Powered Solutions, Price Waterhouse Coopers.

15. Glotov, V., & Gunina, A. (2014). Analysis of UAV applications for aerial imaging processes. *Modern Achievements of Geodetic Science and Production*, 2(28), 65–77.

Отримано 09.12.2024

Viktor Vorokh¹, Vitalii Zatserkovnyi²¹PhD student, Department of Geoinformatics

Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: fainkucha@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-0112-8422>²Doctor of Technical Sciences, Professor, Head, Department of Geoinformatics

Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>. **Scopus ID:** 57200165109**USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN PRECISION AGRICULTURE**

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in agriculture in general, and precision agriculture in particular, is expanding significantly every year. UAVs are employed in various tasks, including sowing, monitoring crop growth and yields, field mapping, and spraying crops with plant protection products (PPP) or applying fertilizers. Precision agriculture enables the integration of geospatial data, GIS and remote sensing technologies, artificial intelligence, Big Data, the Internet of Things, and other innovative solutions.

UAVs provide opportunities for rapid monitoring, analyzing field conditions and dynamics, identifying problem areas requiring managerial intervention, evaluating the effectiveness of agronomic practices, and storing photogrammetric data and high-resolution images efficiently. Modern UAVs, accessible to farmers, not only deliver current information on plant condition and growth dynamics but also allow for protective treatment of fields and perennial plantations using pesticides. UAVs can provide georeferenced data on the state of cultivated crops, significantly assisting farmers in maintaining high yields. Moreover, UAVs equipped with multispectral and RGB cameras enable the prompt storage of agricultural images in the near-infrared spectrum, facilitating monitoring of vegetation health and condition. UAV imaging offers much greater detail compared to satellite imagery, achieving resolutions down to centimeters per pixel, thanks to flight altitudes ranging from 100 to 600 meters above ground.

The paper outlines the use of UAVs in precision agriculture and explores field monitoring methods using UAVs. The implementation of UAV imaging technology allows for the creation of electronic field maps and the rapid adoption of managerial decisions based on the collected data. The NDVI index obtained with UAVs provides a more comprehensive and detailed representation of current conditions on individual field sections, a level of detail that is difficult to achieve with satellite imagery.

It is noted that our country has strong potential for adopting UAVs in agriculture, considering their technical, economic, and human resources.

Keywords: precision agriculture, monitoring, digital farming, remote sensing, plant protection products (PPP), pesticides, UAVs, yield improvement.

Fig.: 13. References: 15.

Олександр Васильович Цвик¹, Валентин Миколайович Кравченя²¹аспірант

ННІ «Інститут геології», Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна),

E-mail: tsvik1603@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5464-2078>²аспірант

ННІ «Інститут геології», Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: kvn_2005@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4160-361X>**ТОПОГРАФО-ГЕОДЕЗИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДОРІГ, ПОШКОДЖЕНИХ УНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВОЇ АГРЕСІЇ**

В останні десять років безпілотні літальні апарати здобули значну популярність, особливо в найбільш розвинених країнах світу. Топографо-геодезичні роботи були проведені шляхом здійснення геодезичних вимірювань на місці, після чого отримані дані були оброблені та внесені до картографічного матеріалу. Стан поверхневого покриття досліджуваної дороги (дорога Т0403) є незадовільним. Встановлено, що впровадження інформаційної системи управління для оцінки технічного стану доріг, пошкоджених унаслідок військової агресії, дозволяє ухвалювати ефективні рішення та сприяє раціональному розподілу фінансових і матеріальних ресурсів.

Ключові слова: дорожнє покриття; вибоїни; БПЛА; ГІС; технічний стан; Phantom 4 Advanced; автошлях Т0403; агресія рф; дефекти дороги.

Рис.: 4. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. Мережа автомобільних доріг України становить близько 170 тис. км, враховуючи території Криму та тимчасово окуповані регіони. Асфальтобетонні покриття переважають на дорогах державного значення, складаючи 79,9 % від загальної площі доріг із твердим покриттям. Якість доріг безпосередньо впливає на безпеку руху, комфорт перевезення пасажирів, ефективність автомобільного транспорту та термін служби дорожніх конструкцій [3]. Таким чином, якість доріг відіграє важливу роль у забезпеченні економічної стабільності та мобільності населення країни. Однак на сьогодні зношеність доріг досягає 97 %, з яких 39 % доріг державного значення не відповідають вимогам за міцністю, а 51 % – за рівністю покриття.

В Україні було розроблено нормативну базу, що регулює використання геоінформаційних систем (ГІС) у дорожній сфері. До неї входять такі документи: «Паспорт автомобільної дороги» (СОУ 45.2–00018112–038:2016), «Вимоги до автоматизованої системи управління дорожньою галуззю» (СОУ 45.2–00018112–063:2011), «Норми часу на супроводження геоінформаційної системи Укравтодору» (СОУ 42.1–37641918–109:2013), «Вимоги до комплексу робіт з інформаційного забезпечення дорожньої галузі. Автомобільні дороги, введені в експлуатацію» (СОУ 42.1–37641918–122:2014), а також «Геоінформаційна система автомобільних доріг. Вимоги до складу, змісту та застосування» (СОУ 42.1–37641918–063:2016).

Постановка проблеми. Обслуговування та ремонт доріг є важливими завданнями, які потребують ретельного збору даних про стан доріг для визначення необхідності таких робіт. Традиційні методи ручної перевірки доріг займають багато часу, потребують значних трудових ресурсів і можуть бути суб'єктивними [5]. Є автоматизовані методи, такі як спеціалізовані оглядові транспортні засоби, оснащені стереокамерами, LiDAR-технологією та лазерними профілерами, які підвищують ефективність та об'єктивність огляду доріг. Однак огляд одним транспортним засобом покриває лише частину дороги, тому для повного огляду необхідно виконувати кілька проїздів, що може впливати на рух транспорту, особливо на дорогах із високою інтенсивністю руху [1].

Останні десять років у сфері топографо-геодезичної та картографічної діяльності відзначилися стрімким розвитком геоінформаційних технологій, глобальних систем визначення координат, аерокосмічних систем високої роздільної здатності для збору

інформації про Землю, а також цифрових методів обробки зображень та геопросторових даних. Одним із ключових технологічних чинників, що впливатиме на подальший розвиток галузі, є створення національної інфраструктури геопросторових даних. Топографо-геодезичні роботи виконуються для дослідження поверхні території, за результатами яких розробляються графічні матеріали [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Китайські фахівці повідомили про створення пристрою, який об'єднує акселерометри та GPS для отримання просторово координованих даних про якість дорожнього покриття [13]. Японські колеги використовують міжнародний індекс рівності (IRI) для оцінювання стану громадських доріг у містах префектури Хоккайдо та застосовують географічну інформаційну систему ArcGIS для організації бази просторових даних і їхньої візуалізації на цифрових картах [17]. Технології дистанційного зондування Землі також широко використовуються. Група вчених із США, Японії та Індонезії застосувала супутниковий радіолокаційний моніторинг (PSI-SAR) для виявлення та вимірювання зсувів автомобільних доріг та елементів рельєфу внаслідок природних зсувів на території Західної Суматри (Індонезія) [12]. Геокодовані зображення деформацій земної поверхні були накладені на фотограмметричну модель досліджуваної території [15]. Окремою темою досліджень зарубіжних колег є розробка систем автоматичного моніторингу для визначення деформації мостових переходів у реальному часі за допомогою супутникових приймачів BDS та GPS [11].

Метою статті є опис топографо-геодезичного забезпечення оцінки технічного стану доріг, пошкоджених унаслідок військової агресії, за допомогою БПЛА.

Виклад основного матеріалу. Використання сучасних технологій, таких як GNSS, лазерне сканування та аерофотознімання за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), дозволяє виконувати геодезичні роботи з високою точністю та швидкістю. Відповідно до Закону України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність», основою для проведення геодезичних та землепорядних робіт є державна геодезична мережа. Це система геодезичних пунктів, яка забезпечує передачу координат на територію держави і є вихідною базою для створення інших мереж [7].

Державна геодезична мережа України включає такі сегменти: Українська постійно діюча мережа спостережень ГНСС, планова геодезична мережа 1–3 класів та мережа згущення 4 класу, нівелірна мережа I-IV класів, гравіметрична фундаментальна мережа та мережа 1 класу. Через збройну агресію Росії дані про стан геодезичної мережі на території Херсонської області станом на 2023–2024 роки відсутні. Можна лише припустити про рівень її руйнування внаслідок бойових дій, базуючись на доступній публічній інформації та відкритих даних із мережі «Інтернет».

Інфраструктурні об'єкти стали однією з головних цілей агресора під час повномасштабної війни проти України. Докладний аналіз стану доріг, зокрема пошкоджень від обстрілів і руху танків, можливий лише за умови проведення спеціалізованих технічних оглядів. Однак це є неможливим у тих регіонах, де досі тривають активні бойові дії, або де частина доріг і мостів знаходиться на тимчасово окупованих територіях. За попередніми оцінками, внаслідок бойових дій було зруйновано близько 23,8 тис. км доріг і 305 мостів та мостових переходів. Першочерговий огляд доріг у звільнених регіонах (Чернігівська, Київська, Сумська, Харківська області) підтверджує значні пошкодження дорожньої інфраструктури через прохід танків та іншої важкої техніки, що вимагає відновлення значної кількості доріг.

Найбільших пошкоджень зазнали такі об'єкти:

1. Місцеві дороги обласного і сільського значення, а також вулиці та дороги в межах населених пунктів (комунальні дороги), що становлять 32 %.

2. Автомобільні дороги державного значення, зокрема міжнародні, національні, регіональні та територіальні шляхи (21 %).

Шкода, завдана мостам на дорогах державного і місцевого значення, а також комунальним дорогам та залізничній інфраструктурі, оцінюється приблизно у 4,4 мільярда доларів США, що становить 12 % від загальних збитків у транспортному секторі [10].

Одним зі способів вирішення проблеми відновлення доріг, пошкоджених під час війни, є застосування математичних моделей і алгоритмів для прогнозування стану дорожнього покриття та визначення оптимальних методів його відновлення. Відповідно до Наказу Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України № 182 від 24 березня 2023 року (zareestrovano у Міністерстві юстиції України 3 травня 2023 року під номером 733 / 39789), була розроблена методика оцінки ступеня пошкодження доріг через бойові дії. У разі неможливості доступу до зруйнованих об'єктів застосовуються непрямі методи оцінки збитків. Непряма оцінка пошкоджень доріг здійснюється за спеціальною формулою:

$$V_{dr1} = \sum (L_{dr} * \%i_w * \sum(\%d \cdot P)), \quad (1)$$

де V_{dr1} (Value of damaged roads) – непряма загальна оцінка пошкоджень доріг по країні;

L_{dr} (length of damaged roads) – довжина усіх доріг у кожній області / регіоні;

$\%i_w$ (% of roads involved in the war) – відсоток пошкоджених доріг, які були залучені в бойових діях у відповідній області / регіоні;

$\%d$ (% of damaged roads) – відсоток кілометрів автомобільних доріг, пошкоджених унаслідок бойових дій в області. Для областей і регіонів України, де неможливо провести візуальний огляд через активні бойові дії чи окупацію, такий відсоток визначається як середнє значення в тих областях та районах України, де відбувались бойові дії з порівняним рівнем інтенсивності та де є доступ для візуальної оцінки пошкоджень;

P (price) – середня ціна відтворення 1 км доріг відповідної групи (млн доларів США/км).

Для більш ефективного використання даних можуть бути створені системи моніторингу та контролю стану доріг, які дозволять збирати інформацію про дефекти та їх поширення на дорозі. Ці дані можна буде використовувати для прогнозування майбутнього стану дорожнього покриття і планування ремонтних робіт. Одним із прикладів подібної системи є програмне забезпечення Road Doctor, розроблене компанією ARRB Group. Воно аналізує стан дороги на основі даних, зібраних спеціальними сенсорами, і обчислює залишковий ресурс дорожнього покриття. Програма пропонує оптимальні методи відновлення і розраховує вартість необхідних робіт [8].

З розвитком дистанційного зондування, фотограмметрії та відповідних програмних засобів, можливості вилучення характеристик дорожнього покриття з фотографій розширилися від наукових до інженерних застосувань. На постраждалих від військових дій територіях, де необхідно швидко проводити зйомки великих площ (у масштабі 1:500–2000), традиційні методи інструментальної зйомки демонструють недоліки. Нині при великомасштабній зйомці великих ділянок дедалі частіше застосовують аерофотозйомку за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Залежно від типу та моделі БПЛА, за один політ можна отримати зображення території від кількох десятків до кількох тисяч гектарів [14]. Це особливо важливо для швидкого збору геодезичних даних, наприклад, для інвентаризації земель або подальшого проектування. Сучасні моделі БПЛА зазвичай обладнані цифровими камерами, що дозволяє отримувати знімки з високою точністю. Використання БПЛА для аерофотозйомки великих територій є дешевшим і швидшим рішенням [9].

Процес зйомки за допомогою БПЛА складається з трьох етапів:

1. Перший етап включає встановлення опорних знаків на місцевості та їх прив'язку до пунктів державної геодезичної мережі, що забезпечує високу точність отриманих даних.

2. Другий етап – автоматичне знімання території за наперед визначеним маршрутом з перекриттям кадрів та заданою висотою польоту, майже без участі оператора.

3. Третій етап – обробка отриманих фотографій за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє об'єднати знімки та отримати кінцеві результати.

Для оцінки технічного стану доріг, пошкоджених внаслідок військової агресії, використовували сучасне програмне забезпечення Road Doctor або Drone Deploy, а також дані геодезичних пунктів Херсонської області (Бериславський район) та зображення, отримані за допомогою БПЛА (модель Phantom 4 Advanced) (рис. 1, а). Зйомка території проводилася із застосуванням GNSS RTK-приймача GPS «Leica Geosystems» GS 08 plus і тахеометра Trimble M³ 5» DR. Отримані зображення були оброблені та скориговані за допомогою Drone Deploy (Android або iOS) і перетворені з системи координат СК – 63 у WGS – 84. Оцінювання ступеня руйнування геодезичних знаків проводилася в програмі QGIS 3.34.0-Prizren з використанням карти Google Hybrid, на яку було нанесено відомі координати розташування геодезичних пунктів у Бериславському районі Херсонської області (автошлях Т0403) (рис. 1, б).

Всього було визначено місцезнаходження 342 геодезичних знаків. Для початкового аналізу взято за основу, що всі знаки до початку бойових дій були в задовільному стані. Наступним етапом став візуальний аналіз знімків місцевості, отриманих за допомогою безпілотників, для виявлення наслідків військових дій на дорогах (сліди важкої техніки, вирви від обстрілів, сліди пожеж). На основі цих знімків оцінювалися пошкодження та ступінь руйнування дорожнього покриття.

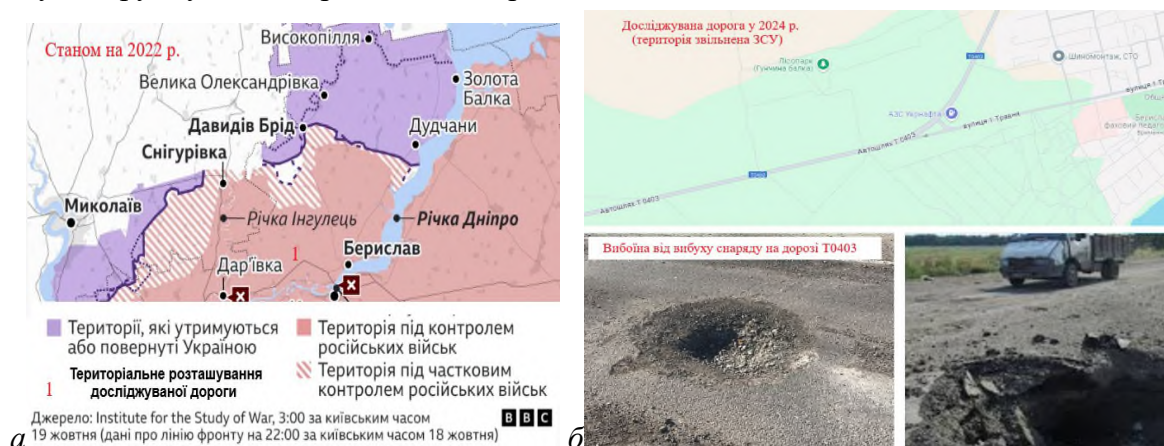


Рис. 1. Розташування досліджуваної дороги під час окупації рф у 2022 р. (а) та основні типи пошкоджень дороги, виявлені у 2024 р. (б)

Джерело: розроблено авторами.

Досліджувана ділянка дороги була сфотографована дроном, який зробив 733 знімки на висоті 35 метрів із роздільною здатністю 1,5 см/піксель. Висота польоту була обрана з урахуванням того, що через дорогу проходив високовольтний кабель. Параметри місії включали фронтальний нахил у 75 %, боковий нахил у 70 % і напрямок польоту під кутом 69°. Швидкість картографування становила 4 м/с, з кутом зйомки від – 69° до – 90°. Параметри камери: розмір пікселя – 1,56 × 1,56 мкм, роздільна здатність знімка на місцевості – 0,168 мм/піксель. Було зафіксовано 337,034 зв'язкові точки, а похибка проєкції становила 1,48 пікселя. Щоб оптимізувати час польоту, застосовували режими з низьким освітленням, автоматичні налаштування, ручне фокусування та експозицію в програмі DJI Go. Ділянка дороги охоплювала площу в один гектар, її довжина становила 1 км.

Обробка та аналіз аерофотознімків здійснювалися за допомогою програм Agisoft Photoscan Professional, Global Mapper та Pix4D Mapper, які є потужними інструментами для фотограмметрії, що перетворюють 2D-зображення у 3D-моделі для виявлення та вимірювання дефектів на дорожньому покритті.

Подальший аналіз фотограмметричних даних виконувався у спеціалізованому програмному забезпеченні для витягання характеристик дороги. DEM (цифрова модель рельєфу) для досліджуваної ділянки мала роздільну здатність 3,18 мм/піксель і щільність 9,86 точок/см². Обробка хмари точок включала 333,034 точки з 409,629, похибка повторної проекції – 1,48 пікселя, кількість зв'язкових точок – 337,034, середній розмір ключової точки – 4,51432 пікселя, а ефективне перекриття – 7,83627. Для аналізу дефектів на дорозі використовувалися профілі, секційний аналіз, об'ємні моделі та вимірювання розмірів. Цей процес передбачає вибір інструменту оцифровки та його застосування для вимірювання виявлених дефектів на зображенні (рис. 2, а).

Імпортована цифрова модель рельєфу (DEM) у програмне забезпечення дозволяє створювати профіль поверхні, який допомагає визначити глибину вибоїн та інших пошкоджень. Після вибору необхідної області на хмарі точок або DEM відкривається діалогове вікно з профілем вибраної ділянки, що дозволяє провести детальний аналіз зображення. На рис. 2 показано приклад вибоїни від вибуху снаряду на досліджуваній дорозі, для якої були розраховані та зафіксовані основні параметри, такі як середня ширина, довжина і глибина пошкодження, а також інші важливі характеристики [16].

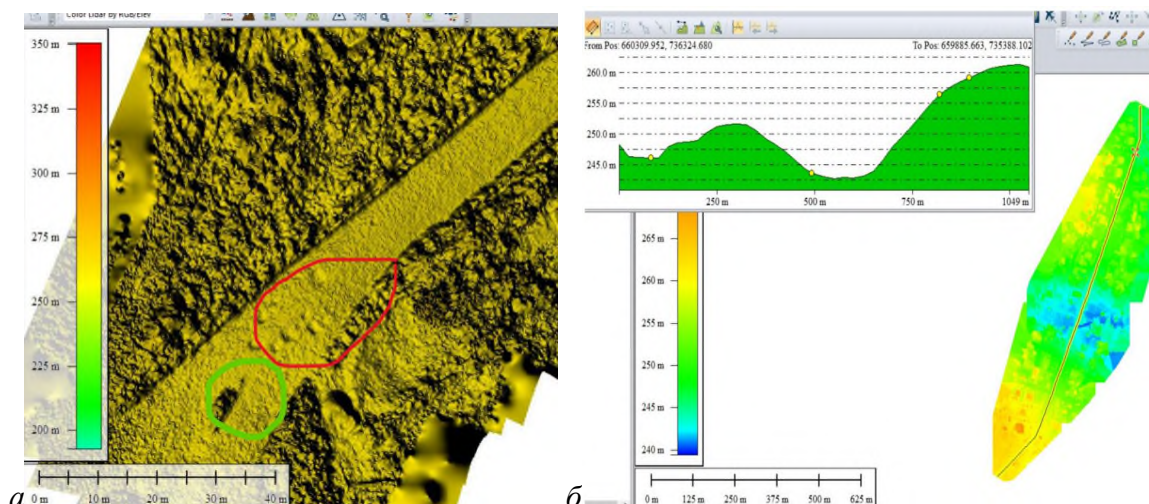


Рис. 2. Оброблене зображення, що отримане з допомогою БПЛА і яке відображає дефекти дороги (бойова вибоїна виділена червоним кольором, а рослинність – зеленим кольором) (а) та вигляд профілю дороги в просторі моделі Global mapper (б)

Джерело: розроблено авторами.

У Global Mapper імпортовані хмара точок, DEM або ортомозаїка аналізувалися шляхом поділу дороги на секції по 50 м (рис. 3). Секціювання було здійснено для полегшення ідентифікації, вилучення, вимірювання та класифікації дефектів. На досліджуваній дорозі були виявлені такі дефекти, як вибоїни, гофрування, колійність, ерозійні жолоби, заростання рослинності [4].

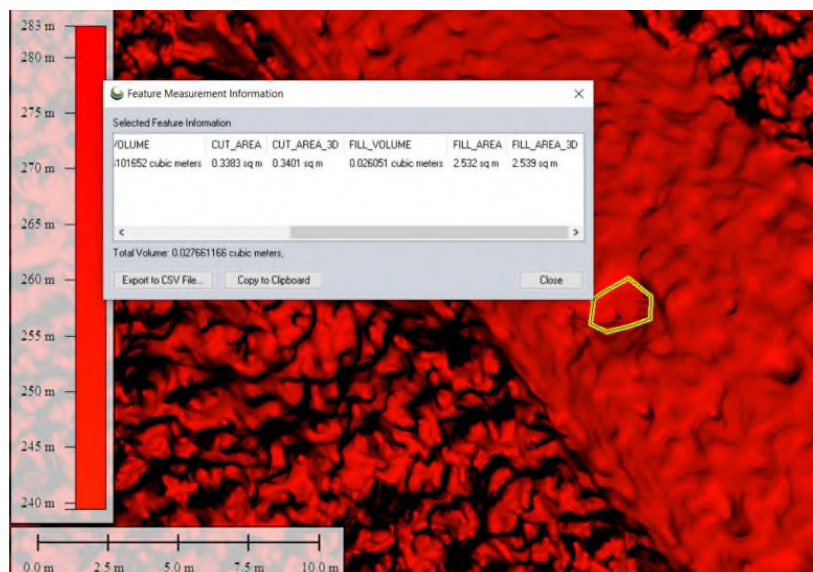


Рис. 3. Вимірювання дефектів у програмному забезпеченні Global Mapper
Джерело: розроблено авторами.

Аналіз супутникових знімків та зображень з безпілотників, проведений поблизу 274 геодезичних пунктів, виявив пошкодження дорожнього покриття на трасі Т0403. Було зафіксовано 68 вибоїн (рис. 1, б), спричинених вибухами снарядів, та 25 ділянок, пошкоджених внаслідок руху військової техніки (зокрема, колії від танків). Також через відсутність оновлених зображень лівого берега Дніпра та з урахуванням частих артилерійських, ракетних і авіаційних ударів по цій території було зафіксовано знищення п'яти геодезичних знаків [6].

На сьогодні активно застосовується штучний інтелект для оцінювання технічного стану доріг, пошкоджених внаслідок військових дій. Один із підходів на основі глибокого навчання – алгоритм «You only look once» (YOLO) – використовується для виявлення об'єктів (зокрема, дефектів дорожнього покриття) (рис. 4). Алгоритм YOLO здійснює виявлення об'єктів за одне проходження через нейронну мережу. Структура функціональної пірамідальної мережі (FPN) застосовується для покращення навчання в YOLOv4. Точність виявлення пошкоджень на дорожньому покритті досягає від 90 до 99 %.

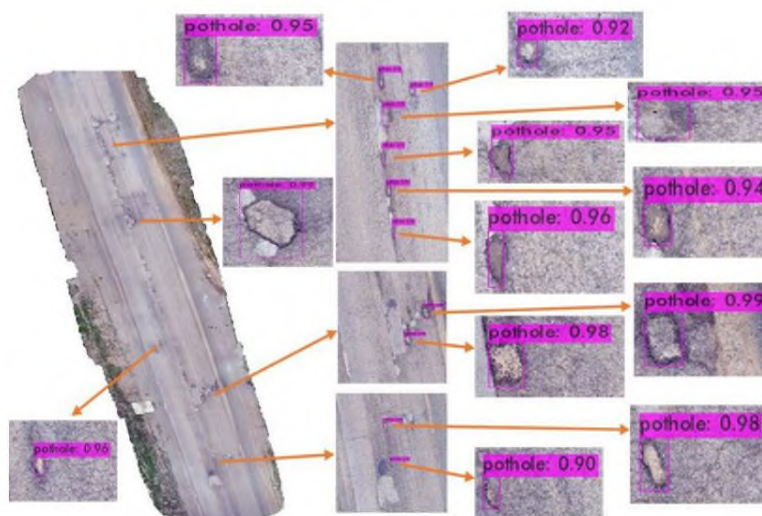


Рис. 4. Виявлення пошкоджень покриття дороги за допомогою алгоритму YOLOv4
Джерело: розроблено авторами.

При застосуванні моделі для виявлення об'єктів за допомогою глибокого навчання важливим фактором є швидкість процесу навчання та тестування. Час, необхідний для цих етапів, залежить від розміру зображення в наборі даних і потужності використовуваного обладнання. Якщо комп'ютер має потужний графічний процесор (GPU), процес навчання займає менше часу, і навпаки. Можна стверджувати, що використання глибокого навчання для оцінки технічного стану доріг, пошкоджених внаслідок військової агресії, є новим і швидким підходом.

Висновки. Топографо-геодезичні роботи були проведені шляхом здійснення геодезичних вимірювань на місці, після чого отримані дані були оброблені та внесені до картографічного матеріалу відповідно до вимог замовника та нормативно-технічної документації. Результати вказують на те, що стан поверхневого покриття досліджуваної дороги (дорога Т0403) є незадовільним. Застосований підхід із використанням зображень з БПЛА дозволяє оцінювати стан досліджуваної дороги та прогнозувати швидкість поширення дефектів на її поверхні, що може суттєво знизити витрати на традиційну інвентаризацію доріг. Проведене дослідження демонструє практичне застосування обстеження стану доріг за допомогою зображень, отриманих із БПЛА. Для більш ефективного моніторингу стану доріг у повністю автоматизованому режимі подальші дослідження мають розглянути можливість використання сучаснішого програмного забезпечення. Можливо, варто розробити повністю автоматизований алгоритм і програму, які б автоматизували оцінювання рівня пошкоджень.

Список використаних джерел

1. Ляшенко, Д. О. Геодезичні технології збирання просторових даних для діагностики та паспортизації автомобільних доріг / Д. О. Ляшенко, Д. О. Павлюк // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – 2021. – Вип. 110. – С. 51-59. DOI: 10.33744 / 0365–8171–2021–110–051–059.
2. Українська навігаційна супутникова система: стан і перспективи / С. В. Нестеренко, Д. А. Єрмоленко, О. В. Шефер, А. В. Клепко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2021. – Вип. 3 (65). – С. 4-7.
3. Нестеренко, С. В. Експериментальна перевірка точності визначення нормальних висот пунктів за даними GNSS-спостережень / С. В. Нестеренко, Р. А. Міщенко // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2022. – Вип. 199. – С. 68-77.
4. Озарко, К. С. Особливості логістичних процесів у воєнний період: проблеми та перспективи розвитку / К. С. Озарко, В. В. Челомбитько // Економічний вісник Донбасу. – 2022. – № 2. – С. 74-78. DOI: [https://doi.org/10.12958/1817–3772–2022–2\(68\)–74–78](https://doi.org/10.12958/1817–3772–2022–2(68)–74–78).
5. Олізаренко, С. А. Розробка функціональної моделі процесу створення бази знань про розпізнавання об'єктів і дій противника на основі нейромереж та нечіткої логіки / С. А. Олізаренко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2017. – № 1. – С. 58-62.
6. Тристан, А. В. Метод автоматизованого планування маршруту польоту безпілотної літального апарату для пошуку динамічного об'єкту / А. В. Тристан, А. О. Бережний // Вісник інженерної академії України. – 2019. – Вип. 4 (34). – С. 67-72.
7. Barbasiewicz, A. The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D / A. Barbasiewicz, T. Widerski, K. Daliga // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 26. – P. 00012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20182600012>.
8. Cannelle, B. Application of photogrammetry and image processing for the study of porous surface courses / B. Cannelle, F. Beltzung, M. Thiémond-Spada // The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B2. – 2020. – Pp. 745-749. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-745-2020>.
9. Measurement of road surface deformation using images captured from UAVs / J. Cardenal, T. Fernández, J. L. Pérez-García, J. M. Gómez-López // Remote Sens. – 2019. – Vol.11 (12). – Pp. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11121507>.
10. Hutsul, T. Features of UAV classification and selection methods / T. Hutsul, I. Zhezhera, V. Tkach // Technical Sciences and Technologies. – 2023. – № 4 (30). – Pp. 201-212. DOI: 10.25140/2411–5363–2022–4(30)–201–212.

11. Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress / L. Inzerillo, R. Roberts, L. Inzerillo, G. Di, R. Roberts, D. Mino // *Automation in Construction*. – 2018. – Vol. 96. – Pp. 457-469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.010>.
12. Unmanned aerial vehicle for road monitoring: fully convolutional networks approach / L. Kotian, A. Chheda, V. Narwane, R. Raut // *Industrial Engineering Journal*. – 2019. – Vol. 12 (6). – Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.26488/iej.12.6.1189>.
13. Mu, Y. Automatic detection of near-surface targets for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) magnetic survey / Y. Mu, X. Zhang, W. Xie, Y. Zheng // *Rem. Sens.* – 2020. – Vol. 12 (3). – P. 452. DOI: [10.3390/rs12030452](https://doi.org/10.3390/rs12030452).
14. Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Photogrammetry to Obtain the International Roughness Index (IRI) on Roads / M. Prosser-Contreras, E. Atencio, F. Muñoz La Rivera, R. F. Herrera // *Appl. Sci.* – 2020. – Vol. 10. – P. 8788. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10248788>.
15. Roberts, R. Using UAV based 3D modelling to provide smart monitoring of road pavement conditions / R. Roberts, L. Inzerillo, G. Di Mino // *Information (Basel)*. – 2020. – Vol. 11(12). DOI: <https://doi.org/10.3390/info11120568>.
16. Saad, A. M. Identification of rut and pothole by using multirotor unmanned aerial vehicle (UAV) / A. M. Saad, K. N. Tahar // *Measurement*. – 2019. – Vol. 137. – Pp. 647–654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.093>.
17. Tan, Y. UAV photogrammetry-based 3D road distress detection / Y. Tan, Y. Li // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2019. – Vol. 8(9). – P. 409. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi8090409>.

References

1. Liashenko, D.O., Pavliuk, D.O. (2021). Heodezychni tekhnolohii zbyrannia prostorovykh danykh dlia diahnostryky ta pasportyzatsii avtomobilnykh dorih [Geodetic technologies of spatial data collection for highway diagnostics and certification]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo - Automobile roads and road construction*, 110, 51–59. doi: 10.33744/0365–8171–2021–110–051–059.
2. Nesterenko, S.V. (2021). Ukrainska navihatsiina suputnykova systema: stan i perspektyvy [Ukrainian navigation satellite system: status and prospects]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku – Control, navigation and communication systems*, 3(65), 4–7.
3. Nesterenko, S.V. (2022). Eksperymentalna perevirka tochnosti vyznachennia vysot punktiv za danymy GNSS-sposterezhen [Experimental verification of the accuracy of determining the heights of points based on the data of GNSS observations]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainkoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 199, 68–77.
4. Ozarko, K.S., Chelomytko, V.V. (2022). Osoblyvosti lohistychnykh protsesiv u voiennyi period: problemy ta perspektyvy rozvytku [Peculiarities of logistics processes during the war period: problems and development prospects]. *Ekonomichnyi visnyk Donbasu – Economic Herald of Donbass*, 2(68), 74–78. doi: 10.12958/1817-3772-2022-2(68)-74-78.
5. Olizarenko, S.A. (2017). Rozrobka funktsionalnoi modeli protsesu stvorennia bazy znan pro rozpoznavannia obiektiv i dii protyvnyka na osnovi neiromeretzh ta nechitkoi lohiky [Development of a functional model of the process of creating a knowledge base on the recognition of enemy objects and actions based on neural networks and fuzzy logic]. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl – Collection of scientific works of the Kharkiv National University of the Air Force*, 1(50), 58–62.
6. Trystan, A.V., Berezhnyi, A.O. (2019). Metod avtomatyzovanoho planuvannia marshrutu polotu bezpilotnoho litalnoho aparatu dlia poshuku dynamichnoho obiektu [A method of automated flight route planning of an unmanned aerial vehicle to search for a dynamic object]. *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy – Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, 4(34), 67–72.
7. Barbasiewicz, A., Widerski, T., & Daliga, K. (2018). The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D. *E3S Web of Conferences*, 26, 00012. doi: 10.1051/e3sconf/20182600012.
8. Cannelle, B., Beltzung, F. (2020). Application of photogrammetry and image processing for the study of porous surface courses. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. doi: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2–2020–745–2020.

9. Cardenal, J., Fernández, T., Pérez-García, J. L., & Gómez-López, J. M. (2019). Measurement of road surface deformation using images captured from UAVs. *Remote Sens.*, *11*(12), 1–24. doi: 10.3390/rs11121507.
10. Hutsul, T., Zhezhera, I., Tkach, V. (2023). Features of UAV classification and selection methods. *Technical Sciences and Technologies*, *4*(30), 201–212. doi: 10.25140/2411–5363–2022–4(30)–201–212.
11. Inzerillo, L., Roberts, R., Inzerillo, L., Di, G., Roberts, R., Mino, D. (2018). Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress. *Automation in Construction*. doi: 10.1016/j.autcon.2018.10.010.
12. Kotian, L., Chheda, A., Narwane, V., Raut, R. (2019). Unmanned aerial vehicle for road monitoring: fully convolutional networks approach. *Industrial Engineering Journal*, *12*(6), 1–8. doi: 10.26488/iej.12.6.1189.
13. Mu, Y., Zhang, X., Xie, W., Zheng, Y. (2020). Automatic detection of near-surface targets for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) magnetic survey. *Rem. Sens.*, *12*(3), 452. doi: 10.3390/rs12030452.
14. Prosser-Contreras, M., Atencio, E., Muñoz La Rivera, F., Herrera, R. F. (2020). Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Photogrammetry to Obtain the International Roughness Index (IRI) on Roads. *Appl. Sci.*, *10*, 8788. doi: 10.3390/app10248788.
15. Roberts, R., Inzerillo, L., & Di Mino, G. (2020). Using UAV based 3D modelling to provide smart monitoring of road pavement conditions. *Information*. doi: 10.3390/info11120568.
16. Saad, A. M., Tahar, K. N. (2019). Identification of rut and pothole by using multirotor unmanned aerial vehicle (UAV). *Measurement*, *137*, 647–654. doi: 10.1016/j.measurement.2019.01.093.
17. Tan, Y., & Li, Y. (2019). UAV photogrammetry-based 3D road distress detection. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. doi: 10.3390/ijgi8090409.

Отримано 08.12.2024

UDC 528.8

Oleksandr Tsvyk¹, Valentyn Kravchenia²

¹PhD

NNI "Institute of Geology" Taras Shevchenko Kyiv National University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: tsvik1603@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5464-2078>

²PhD student

NNI "Institute of Geology", Taras Shevchenko Kyiv National University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: kvn_2005@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4160-361X>

TOPOGRAPHIC AND GEODETIC SUPPORT FOR ASSESSING THE TECHNICAL CONDITION OF ROADS DAMAGED AS A RESULT OF MILITARY AGGRESSION

In the last ten years, unmanned aerial vehicles (UAVs) have gained significant popularity, especially in the most developed countries of the world. Their field of application is quite broad. Drones can monitor road conditions in both urban and remote areas. Topographic and geodetic work was conducted through on-site geodetic measurements, after which the obtained data were processed and incorporated into cartographic materials in accordance with the client's requirements and regulatory technical documentation. The results indicate that the surface condition of the studied road (road T0403) is unsatisfactory.

The purpose of the article is to describe the topographic and geodetic support for assessing the technical condition of roads damaged as a result of military aggression using UAVs.

It has been established that the implementation of an information management system for assessing the technical condition of roads damaged due to military aggression, which combines GIS capabilities and modern automated data collection tools, allows for effective decision-making aimed at ensuring the normative technical and operational state of the surface throughout its service life and contributes to the rational allocation of financial and material resources. The use of an approach based on images obtained from unmanned aerial vehicles (UAVs) allows for effective assessment of the condition of the studied road and forecasting the rate of defect spread on its surface. This can significantly reduce costs associated with traditional road inventory methods. The conducted study illustrates the practical application of road condition assessment methods using UAV images. To enhance the efficiency of road condition monitoring in a fully automated mode, further research should consider the implementation of modern software solutions. Additionally, it is advisable to develop a fully automated algorithm and program that will ensure automatic assessment of the level of damage.

The paper proposes for the first time the use of geodetic points and images obtained through UAVs for assessing the technical condition of roads.

Keywords: road surface; potholes; UAVs; GIS; technical condition; Phantom 4 Advanced; highway T0403; aggression of the Russian Federation, road defects.

Fig.: 4. References: 17.

Олександр Володимирович Герба

аспірант кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин
Національний університет водного господарства та природокористування (Рівне, Україна)
E-mail: o.v.herba@nuwm.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7592-800X>

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПІРАЛЕПОДІБНИХ
ТУРБІН ДЛЯ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ЯДЕРНИХ УСТАНОВОК**

В умовах сучасних загроз, особливо за обставин воєнного стану під час війни з росією, безпека атомних електростанцій потребує підвищених заходів захисту та вимог до надійності систем безпеки. Забезпечення безперервного живлення систем охолодження, вентиляції, аварійного реагування та контролю стану реакторів є критичним для запобігання катастрофічним наслідкам. Однією з ключових проблем є ризик раптового відключення енергопостачання через зовнішні фактори або пошкодження інфраструктури. У таких ситуаціях автономні генератори стають необхідним засобом забезпечення безпеки. У статті розглянуто конструктивні особливості спіралеподібних турбін, аналізуються результати проведених досліджень та можливості їх застосування, зокрема для роботи з водяними потоками низького напору. Для експериментального аналізу використовувалася спеціальна лабораторна установка, яка дозволяє моделювати різні умови водного потоку. Проведено серію експериментів для оцінки таких параметрів, як швидкість обертання турбіни, вихідна напруга та ефективність генерації електроенергії за різних режимів навантаження та рівнів води. Висвітлено перспективи інтеграції спіралеподібних турбін у системи резервного енергопостачання ядерних об'єктів. Завдяки своїм конструктивним особливостям ці турбіни можуть ефективно працювати в потоках із мінімальним напором води, що дозволяє застосовувати їх у замкнених системах циркуляції або для аварійного відведення тепла з активної зони реакторів. Це сприяє підвищенню автономності систем контролю та забезпечує додаткове джерело живлення для критично важливих вузлів, що мінімізує ризики перегрівання ядерного палива в разі відмови основних електричних систем. Таким чином, запропоновані рішення зі спіралеподібними турбінами сприяють підвищенню стійкості ядерних об'єктів до зовнішніх впливів, забезпечують автономність та мінімізують ризики аварійних ситуацій в умовах нестабільного енергопостачання.

Ключові слова: турбіна; енергоефективність; спіралеподібна турбіна; атомна електростанція; ядерна безпека; резервне енергопостачання; охолодження реактора; пасивне тепловідведення; рециркуляція води.

Табл.: 1. Рис.: 6. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Атомні електростанції (АЕС) є критичною інфраструктурою, де безперервне охолодження та стабільне постачання енергії виступають ключовими чинниками забезпечення безпеки. Під час російського вторгнення 2022 року було окуповано найбільшу в Європі атомну електростанцію – Запорізьку АЕС. Такі події яскраво продемонстрували вразливість енергетичних систем перед обличчям безпрецедентних загроз для ядерної безпеки. Небезпеку від радіаційного забруднення досі важко передбачити. Вона може проявитися досить швидко, подібно до променевої хвороби, а може позначитися через роки [1]. Це акцентує увагу на необхідності розробки ефективних рішень для запобігання аварійним ситуаціям і мінімізації їхніх наслідків.

Постановка проблеми. У статті розглянуто проблему забезпечення стабільної роботи систем охолодження атомних електростанцій в умовах можливих аварійних ситуацій. Відзначено необхідність пошуку і впровадження більш надійних автономних і пасивних енергетичних рішень, які можуть забезпечити безперервність критичних процесів на АЕС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У процесі дослідження раціональних умов роботи різних типів турбін, що працюють при малих напорах, а також на основі аналізу шнекових турбін [2] і вивчення праць Шаубергера [3] та Оніпка [4], було визначено конструктивні рішення для проєктування покращеної спіралеподібної турбіни [5]. Ця турбіна використовуватиме можливості природного завихрення водного середовища з максимальною ефективністю.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У цій роботі досліджено потенціал застосування спіралеподібних турбін у системах охолодження ядерних об'єктів. Зокрема, аналізуються їхні конструктивні особливості, що можуть сприяти підвищенню продуктивності та енергоефективності. Водночас залишається недостатньо вивченим вплив різних параметрів турбіни на ефективність теплообміну, а також оптимальні режими її роботи в умовах змінних навантажень.

Мета дослідження полягає у визначенні раціональної конструкції серед досліджуваних моделей спіралеподібних турбін для забезпечення їхньої енергоефективності, надійності та безпеки в системах охолодження ядерних об'єктів. Особливу увагу приділено оцінці ефективності перетворення енергії водного потоку в механічну та електричну енергію за умов стабільної роботи турбін при низькому напорі води.

Результати досліджень. Запропоновані турбіни мають значний потенціал для інтеграції в системи охолодження АЕС для ядерної безпеки завдяки їхнім конструктивним характеристикам і можливостям забезпечувати надійну роботу за умов низьких напорів та обмежених ресурсів. Їх використання може значно посилити автономність і стійкість критично важливих систем, які забезпечують безпеку на атомних електростанціях. Нижче розглянуто основні напрями застосування спіральних турбін у системах охолодження ядерних об'єктів.

Автономні системи охолодження. Автономне охолодження є критично важливим компонентом ядерної безпеки, що забезпечує підтримку безпечної температури реакторного обладнання в умовах відсутності зовнішнього енергопостачання. Спіралеподібні турбіни забезпечують стабільний запуск і функціонування при низьких витратах, що є важливим у надзвичайних ситуаціях, коли доступ до води може бути обмеженим. Такі турбіни можуть бути інтегровані в системи природної або примусової циркуляції охолоджувальної рідини.

Аварійне електропостачання. Під час аварійних ситуацій, таких як відключення основних джерел енергії, спіральні турбіни можуть забезпечувати резервне електропостачання для критично важливих систем, включаючи контроль реактора, системи вентиляції та моніторинг стану обладнання.

Рециркуляція води для пасивного тепловідведення. Ефективна рециркуляція води є важливою для забезпечення пасивного тепловідведення з реактора та інших теплоємних елементів атомної електростанції. Спіралеподібні турбіни можуть використовуватися для підтримки циркуляції води між реактором і природними водними джерелами (річками, озерами) або замкнутими системами охолодження.

Однією з ключових переваг цих турбін є їхня здатність до запуску й стабільної роботи в умовах низького потоку води. Це особливо важливо для аварійних ситуацій, коли звичайні умови функціонування енергетичних систем порушені. Конструктивні особливості оптимальної спіралеподібної турбіни для використання в системах охолодження ядерних об'єктів такі. Спіралеподібна турбіна [5; 6; 7] з прямими лопатями та звуженим корпусом (рис. 1) має унікальні механічні переваги перед класичною шнековою турбіною та продуктивніша за інші спіралеподібні турбіни.

Рисунок 1 демонструє внутрішню структуру конструкції турбіни, де лопаті 3 з'єднують корпус 2 з валом 1 вздовж всієї турбіни. Звужена конструкція зменшує площу виходу потоку $\Delta S > \Delta S_1$, створюючи додаткову реактивну тягу, що підвищує ефективність завдяки зниженню необхідної швидкості потоку для запуску. Це особливо корисно для систем, де контроль швидкості потоку обмежений, наприклад, в аварійних системах охолодження на АЕС. Практичні випробування спіралеподібної турбіни продемонстрували її вищу ефективність за умов низького напору. Було зафіксовано значне зниження мінімальної швидкості потоку, необхідної для запуску турбіни, що зумовлено використанням звужувального корпусу та ефекту маховика.

Експериментальні дослідження моделей спіралеподібних [5] турбін вимагають відтворення умов, максимально наближених до реальних. Для цього було використано спеціальну лабораторну установку, яка забезпечує широкий спектр регульованих параметрів і стабільність вимірювань. Високий рівень відтворюваності результатів досягається завдяки вдосконаленим методикам досліджень та використанню сучасних сенсорів для вимірювання характеристик водяного потоку [8].

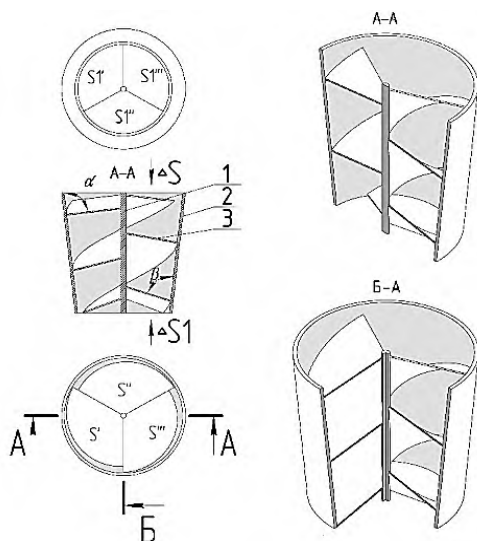


Рис. 1. Схема турбіни з прямими спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу:
1 – вал; 2 – корпус; 3 – лопать

Джерело: розроблено автором.

Лабораторна установка складається з трьох функціональних зон: напірний бак з трикутним вимірювальним водозливом, зона стабілізації потоку із заспокійливими решітками, та робоча частина з експериментальним пристроєм для турбін. Вода подається по трубопроводу і проходить через систему вимірювання глибини, після чого повертається в резервуар насосної станції. Для контролю рівня використовується засувка, що дозволяє змінювати напір на вході (рис. 2).

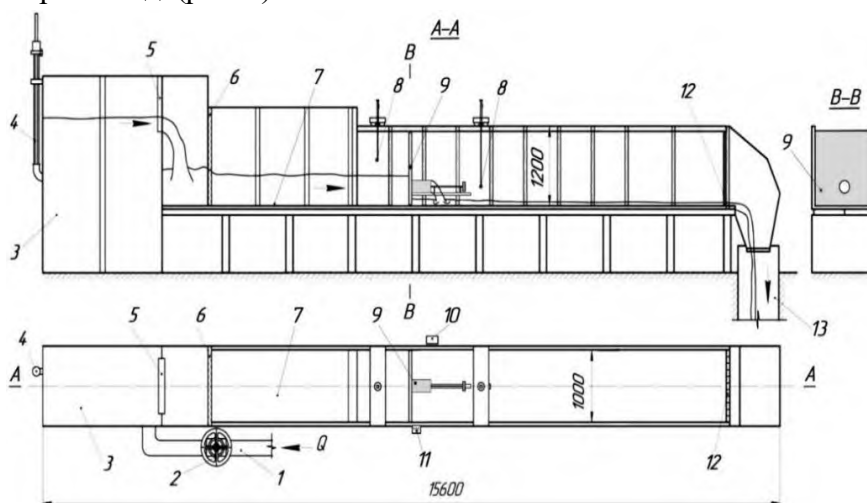


Рис. 2 – Функціональна схема лабораторної установки:
1 – підвідний трубопровід; 2 – засувка; 3 – голова лотка; 4 – п'єзометр для визначення напору на трикутному водозливі; 5 – вимірювальний трикутний водозлив; 6 – заспокійлива решітка; 7 – лотік лабораторної установки; 8 – датчики рівня води та шпигун масштаби; 9 – експериментальний пристрій для дослідження; 10 – автоматичний контролер; 11 – блок керування навантаженням; 12 – шпигуний затвор; 13 – резервуар для відведення води

Експериментальний пристрій 9 дозволяє легко змінювати досліджувані моделі турбін, які встановлюються на одній осі з генератором. Конструкція пристрою забезпечує можливість створення різних напорів води та дозволяє оцінювати ефективність роботи турбін за різних умов навантаження (рис. 3).



Рис. 3. Зовнішній вигляд експериментального пристрою з контрольними позначками рівня води у верхньому б'єфі

Джерело: розроблено автором.

Щоб якісно провести аналіз отриманих показників з генератора, в блоці керування навантаженням *II* було збільшено електричне навантаження до трьох лампочок (рис. 4) загальною потужністю 63 Вт (3*21 Вт), що забезпечило можливість зняття показів без навантаження та в трьох режимах навантаження.



Рис. 4. Зовнішній вигляд блоку з електричним навантаженням

Джерело: розроблено автором.

Також збільшено до п'яти кількість контрольних відміток для зняття показів рівня води у верхньому б'єфі (рис. 3).

Лабораторна установка забезпечує високу точність і надійність експериментів, що сприяє отриманню достовірних даних для визначення найефективнішої моделі турбіни. Для визначення ефективності було проведено дослідження трьох моделей спіралеподібних турбін, а саме: турбіна зі спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу (I); турбіна зі спіралеподібними лопатями, які збільшуються в об'ємі (II); турбіна з будовою лопатей за принципом золотої спіралі (III). У результаті планування експериментів були визначені основні параметри, які необхідно контролювати під час досліджень. До цих параметрів віднесено: n_x – кількість обертів турбіни в режимі холостого ходу та під навантаженням, об/хв; U_x – вироблена напруга в різних режимах навантаження, В; h_x – рівень води у верхньому б'єфі, см; h_0 – рівень води у верхньому б'єфі, при якому проходить страгування турбіни, см; P_x – навантаження потужністю 0 Вт/ 21Вт/ 42Вт/ 63Вт. Під час проведення експериментів всі показники записувалися в таблицю (табл. 1) для подальшого аналізу та формулювання висновків. Контрольні експерименти дали базу для оцінки продуктивності

цих моделей. Для визначення найкращого варіанту моделі турбіни на основі аналізу впливу рівня води у верхньому б'єфі на конструкції досліджуваних турбін у режимах холостого ходу (P_1) та під навантаженням (P_2, P_3, P_4), кожній із моделей надається по шість значень рівня верхнього б'єфа (h). Таким чином, для оцінки ефективності різних варіантів серед досліджуваних турбін необхідно провести $3 \cdot 24 = 72$ експерименти, під час яких буде отримано 144 показники.

Таблиця 1 – Отримані показники досліджуваних моделей спіралеподібних турбін

Модель	P	$h_0, \text{см}$	$h, \text{см}$	20	30	40	50	60
Турбіна з будовою лопатей за принципом золотої спіралі (III)	P_1	11,3	U_1, B	9	13	16,7	20	23,7
			$n_1, \text{об/хв}$	212	311	403	491	602
	P_2	13,5	U_2, B	6,8	10,2	14	17,5	20,9
			$n_2, \text{об/хв}$	163	247	330	420	517
	P_3	14,7	U_3, B	5,2	8	12	15,5	18,1
			$n_3, \text{об/хв}$	129	187	285	368	437
	P_4	15,8	U_4, B	3,9	6,7	10,3	13,5	16,2
			$n_4, \text{об/хв}$	105	160	248	321	388
Турбіна з спіралеподібними лопатями, які збільшуються в об'ємі (II)	P_1	9	U_1, B	9,4	14,1	17,3	20,5	23,9
			$n_1, \text{об/хв}$	223	333	417	504	607
	P_2	12	U_2, B	7,5	11,7	14,5	17,8	21,3
			$n_2, \text{об/хв}$	178	280	342	428	532
	P_3	13,4	U_3, B	5,8	9,1	12,6	15,7	18,6
			$n_3, \text{об/хв}$	143	214	300	375	450
	P_4	15	U_4, B	4,5	7,4	10,8	13,6	16,5
			$n_4, \text{об/хв}$	113	177	259	322	396
Турбіна з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу (I)	P_1	8,8	U_1, B	10,2	14,6	18,5	21,8	24,7
			$n_1, \text{об/хв}$	247	343	447	545	630
	P_2	11,9	U_2, B	7,9	12	15,2	18,8	21,2
			$n_2, \text{об/хв}$	185	285	362	454	527
	P_3	13,4	U_3, B	6,3	9,5	13,1	16,4	18,6
			$n_3, \text{об/хв}$	154	227	314	392	450
	P_4	14,9	U_4, B	4,7	7,6	11,3	14	16,9
			$n_4, \text{об/хв}$	116	180	268	330	407

Джерело: розроблено автором.

Щоб провести порівняння результатів експериментів, усі досліджувані моделі турбін виготовлені з однаковими геометричними параметрами ($\varnothing 200$ мм / 210 мм), а їхня вага приведена до 1100 грамів шляхом додаткового намотування дроту на корпус із подальшим балансуванням. Відхилення за масою становило допустимих ± 5 %.

Дослідження проводилися для кожної комбінації рівнів контрольованих факторів, що дало змогу визначити залежності, які відображають ефективність роботи турбін за заданих умов. У табл. 1 наведено результати, які відображають залежність частоти обертання та вихідної напруги від параметрів водного потоку і навантаження. Особливу увагу приділено рівню води (h_0), при якій турбіни почали обертатися у водному потоці, спрямованому під кутом 90° до поверхні лопатей. Це дозволило визначити мінімальні вимоги до гідродинамічних умов для стабільного запуску турбін. Після проведення експериментів із досліджуваними моделями турбін на кожному рівні висоти води у верхньому б'єфі (h) та при змінних значеннях навантаження (P) виконано аналіз впливу цих факторів на вихідні параметри: швидкість обертання турбіни (n) та електричну напругу (U). Це дозволило обрати оптимальну модель турбіни та оцінити її енергоефективність.

За результатами аналізу найефективнішою виявилася спіралеподібна турбіна з прямими лопатями та звуженим корпусом. Для візуалізації та порівняння ефективності моделей турбін побудовано графіки залежності параметрів для моделі з найкращими показниками (рис. 5, 6).

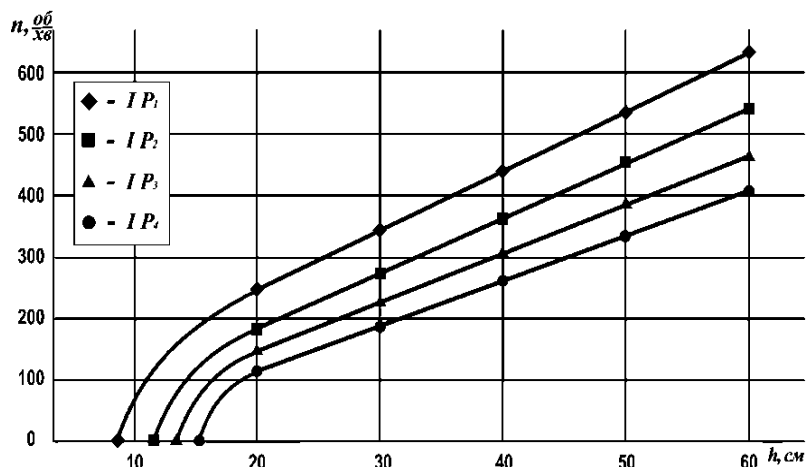


Рис. 5. Графік залежності вироблення генератором та турбіною з прямими спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу (I), обертів (n) в різних режимах навантаження (P_1, P_2, P_3, P_4) від рівня води у верхньому б'єфі (h)

Джерело: розроблено автором.

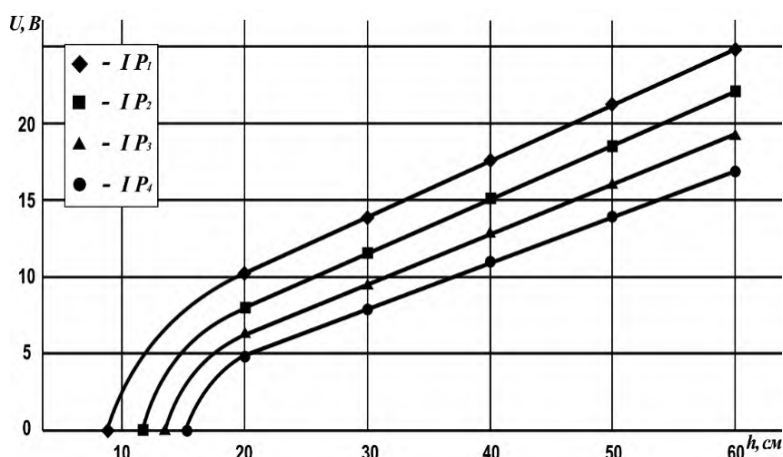


Рис. 6. Графік залежності вироблення генератором та турбіною з прямими спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу (I), напруги U в різних режимах навантаження (P_1, P_2, P_3, P_4) від рівня води у верхньому б'єфі h

Джерело: розроблено автором.

Аналіз результатів досліджень. Для визначення найефективнішої конструкції турбіни та дослідження взаємозв'язку висоти води у верхньому б'єфі з навантаженням на моделі турбін, що працюють у направленому потоці під кутом 90° до лопатей, було проведено порівняння параметрів різних моделей спіралеподібних турбін.

У випадку спіралеподібної турбіни з прямими лопатями та звуженим корпусом за максимального рівня води $h = 60$ см зафіксовано найвищі показники серед усіх досліджуваних турбін (табл. 1):

- швидкість обертання $n_1 = 630$ об/хв;
- вироблена електрична напруга $U_1 = 24,7$ В.

Водночас найнижчі показники турбіни з будовою лопатей за принципом золотої спіралі у режимі холостого ходу становили (табл. 1):

- швидкість обертання $n_1 = 602$ об/хв;
- вироблена електрична напруга $U_1 = 23,7$ В.

Навантаження на турбіни значно впливає на їхню швидкість обертання та генерацію електричної енергії. Як показано на рис. 5 і 6, зі збільшенням навантаження частота обертання досліджуваних турбін знижується, що призводить до відповідного зменшення

напруги на виході генератора. Зокрема, при максимальному навантаженні (P_4) частота обертання і напруга на генераторі спіралеподібної турбіни з прямими лопатями та звуженим корпусом становлять $U_4 = 16,9$ В і $n_4 = 407$ об/хв, тоді як для генератора спіралеподібної турбіни з будовою лопатей за принципом золотої спіралі – $U_4 = 16,2$ В і $n_4 = 388$ об/хв. Конструктивні відмінності та однакова маса досліджуваних турбін забезпечили перевагу моделі з прямими лопатями та звуженим корпусом у порівнянні з турбіною з будовою лопатей за принципом золотої спіралі та іншими дослідженими варіантами. Зокрема, напруга при холостому ході (P_1) зросла на 4,2 %, а при максимальному навантаженні (P_4) – на 4,3 %.

Слід зазначити, що момент страгування за найнижчого рівня води також був продемонстрований турбіною з прямими лопатями та звуженим корпусом. Необхідно продовжити експериментальні дослідження для порівняння ефективності роботи спіралеподібних турбін з іншими типами шнекових та гвинтових турбін. Особливу увагу слід приділити визначенню коефіцієнта корисної дії (ККД) у порівнянні з класичними турбінами, що дозволить оцінити переваги та можливості цих турбін у сучасні енергетичні системи.

Висновки. Спіралеподібні турбіни мають значний потенціал для підвищення надійності та автономності систем охолодження ядерних об'єктів. Завдяки унікальним конструктивним характеристикам, таким як здатність працювати за низького напору та забезпечувати стабільну генерацію енергії навіть за мінімальних витрат води, ці турбіни є перспективними для інтеграції в системи охолодження, аварійного електропостачання та рециркуляції води.

Використання спіралеподібних турбін як автономних генераторів дає змогу знизити ризики відмов енергосистем у надзвичайних ситуаціях, забезпечити стабільне тепловідведення з активної зони реактора та підтримувати безперебійне живлення критично важливих систем. Такий підхід зменшує залежність від зовнішнього енергопостачання і мінімізує вплив зовнішніх загроз на безпеку атомних електростанцій. Впровадження цих технологій відповідає сучасним вимогам енергоефективності та надійності, а також сприяє підвищенню стійкості АЕС до зовнішніх впливів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію спіралеподібних турбін у діючі енергосистеми АЕС, моделювання та оптимізацію їхньої роботи за різних експлуатаційних режимів, а також на оцінку довгострокової надійності та економічної ефективності використання цих турбін у реальних умовах.

Отже, спіралеподібні турбіни не лише підвищують рівень безпеки атомної енергетики, а й відкривають нові перспективи для забезпечення сталого розвитку енергетичної галузі.

Список використаних джерел

1. Овчинніков, О. Атомні електростанції під час війни. Недопустима небезпека [Електронний ресурс] / Олексій Овчинніков // Еко.Район – просвітницьке медіа. – 17.03.2022. – Режим доступу: <https://eco.rayon.in.ua/topics/498209-atomni-elektrostantsii-pid-chas-viyni-nedopustima-nebezpeka>.
2. Умбетов, Е. С. Анализ классификации конструкций микро-ГЭС [Электронный ресурс] / Е. С. Умбетов, Ш. К. Шоколакова // Промышленный Казахстан. – 2014. – № 1. – Режим доступа: <http://cawater-info.net/bk/dam-safety/files/umbetov-shokolakova.pdf>.
3. Schaubberger, V. *The Energy Evolution: Harnessing Free Energy from Nature* / V. Schaubberger. – Gateway, 2000). – 272 p.
4. Китаев, Н. «Ротор онипко» в Украине [Електронний ресурс] / Н. Китаев // SAVENERGY.INFO. – 22.12.2014. – Режим доступу: <https://SAVENERGY.INFO/PAGE/ROTOR-ONIPKO-V-UKRAINE>.
5. Герба, О. В. Патент на корисну модель UA 150304 U. Турбіна зі спіралеподібними лопатями. Україна. Національний орган інтелектуальної власності / О. В. Герба; Державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» // Офіційний електронний бюлетень. – 26.01.2022. – № 4, Том 1. F 03. – С. 4.12.

6. Герба, О. В. Використання турбін зі спіралеподібними лопатями / О. В. Герба // Вісник НУВГП. Технічні науки. – 2023. – Вип. 4(104). – С. 3-12. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt420231>.

7. Герба, О. Експериментальні дослідження моделей турбін малих гідроелектростанцій / О. В. Герба // Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference. – 2024. -№ 7. – Рр. 91–94.. DOI: <https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.024>.

8. Рябенко, О. А. Хвилястий стрибок : монографія /О. А. Рябенко. – Рівне : НУВГП, 2022. – 277 с.

References

1. Ovchynnikov, O. (17.03.2022). Atomni elektrostantsii pid chas viiny. Nedopustyma nebezpeka [Nuclear power plants during war. Unacceptable danger]. *Eco.Rayon - educational media*. <https://eco.rayon.in.ua/topics/498209-atomni-elektrostantsii-pid-chas-viyni-nedopustyma-nebezpeka>.

2. Umbetov, E.S., Shokolakova, Sh.K. (2014). Umbetov, E. S. Analiz klassifikatsii konstruktсии mikro-GES [Analysis of the classification of micro-hydroelectric power structures]. *Promyshlennyi Kazakhstan – Industrial Kazakhstan*, (1). <http://cawater-info.net/bk/dam-safety/files/umbetov-shokolakova.pdf>.

3. Schauburger, V. (2000). *The Energy Evolution: Harnessing Free Energy from Nature*. Gateway.

4. Kitaev, N. (22.12.2014). «Rotor onypko» v Ukrainy [“Onipko rotor” in Ukraine]. *SAVENERGY.INFO*. <https://SAVENERGY.INFO/PAGE/ROTOR-ONIPKO-V-UKRAINE>.

5. Herba, O.V. (26.01.2022). *Turbina zi spiralepodibnymy lopatiamy [Turbine with spiral blades]*. Patent for utility model UA 150304 U.

6. Herba, O.V. (2023). Vykorystannia turbin zi spiralepodibnymy lopatiamy [Use of turbines with spiral blades]. *Visnyk NUVHP. Tekhnichni nauky – Bulletin of the National University of Hydropower. Technical Sciences*, 4(104), 3-12. <https://doi.org/10.31713/vt420231>.

7. Herba, O.V. (2024). Eksperymentalni doslidzhennia modelei turbin malykh hidroelektrostantsii [Experimental studies of turbine models of small hydroelectric power plants]. *Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference*, (7), 91–94. <https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.024>.

8. Riabenko, O.A. (2022). *Khvyliastyi strybok [Wavy jump]*. NUVHP.

Отримано 14.12.2024

UDC 621.438:621.499.3

Oleksandr Herba

PhD student at the Department of Hydropower Engineering, Thermal Power Engineering, and Hydraulic Machines
National University of Water and Environmental Engineering (Rivne, Ukraine)

E-mail: o.v.herba@nuwm.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7592-800X>

SPIRAL TURBINES IN NUCLEAR FACILITY COOLING SYSTEMS

In the context of modern threats, particularly during martial law and the war with Russia, the safety of nuclear power plants requires enhanced protective measures and stringent reliability standards for safety systems. Ensuring uninterrupted power supply for cooling, ventilation, emergency response, and reactor control systems is critical to preventing catastrophic consequences. One of the key challenges is the risk of sudden power outages caused by external factors or infrastructure damage [1]. In such situations, autonomous generators become an essential means of ensuring safety.

This article examines the design features of spiral turbines, analyzes research results, and explores their potential applications, particularly in working with low-head water flows. A specialized laboratory setup was used for experimental analysis, enabling the simulation of various water flow conditions. A series of experiments was conducted to evaluate parameters such as turbine rotational speed, output voltage, and energy generation efficiency under different load conditions and water levels.

The article highlights the prospects of integrating spiral turbines into backup power systems for nuclear facilities. Owing to their design features, these turbines can efficiently operate in water flows with minimal head, making them suitable for use in closed-loop circulation systems or for emergency heat removal from reactor cores. This increases the autonomy of control systems and provides additional power sources for critical components, minimizing the risk of nuclear fuel overheating in case of main power system failures.

Thus, the proposed solutions using spiral turbines enhance the resilience of nuclear facilities to external impacts, ensure autonomy, and minimize the risks of emergency situations under unstable power supply conditions.

Keywords: turbine; energy efficiency; spiral turbines; nuclear power plant; nuclear safety; backup power supply; reactor cooling; passive heat removal; water recirculation.

Table: 1. Fig.: 6. References: 8.

**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

№ 4(38)

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 24.12.2024. Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. – 42,78.
Тираж 100 пр. Замовлення № 32/24.

Редакційно-видавничий відділ
Національного університету «Чернігівська політехніка»
14035, 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.