МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ

№ 6(17), 2023
DOI:10.30857/2786-5371.2023.6

Наукове фахове видання

Періодичність виходу: 6 разів на рік

Дата заснування: грудень 1999 р.

Київ 2023

Засновником видання «Технології та інжиніринг» є
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ
Науковий фаховий журнал є правонаступником видання «Вісник Київського національного університету технологій та дизайну», який у свою чергу був правонаступником видання «Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности», який видавався з березня 1958 року у Київському технологічному інституті легкої промисловості (СРСР).

№ 6(17), 2023

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації: серія КВ №24822–14762 ПР від 19.04.2021р.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК № 993 від 24.07.2002 р.

Журнал входить до переліку наукових фахових видань України. Наказ МОН України від 29.06.2021 №735 (додаток 3). Категорія Б. Технічні науки. Спеціальності: 122, 131, 133, 151, 161, 132, 182, 141, 144, 171 (2018, 2020).

ISSN 2786-5371 print
ISSN 2786-538X online

Журнал зареєстровано в Міжнародному центрі періодичних видань (ISSN International Centre, Париж, Франція)

Журнал реферується та індексується у наступних міжнародних базах даних: Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, Index Copernicus, Research Bible, SJIF, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref

Засновник і видавець:

Київський національний університет технологій та дизайну
Україна, 01011, м. Київ, вул. Мала Шияновська, 2

Головний редактор: **Панасюк І.В.,** д.т.н., професор

Заступник головного редактора: **Злотенко Б. М.,** д.т.н., професор

Відповідальний секретар: **Кривонос О. О.**

Тематична спрямованість журналу «Технології та інжиніринг»: Інформаційні технології, електроніка, механічна та електрична інженерія. Матеріалознавство індустрії моди, технологій виробництва текстилю, одягу та взуття. Хімічні та біофармацевтичні технології.

Видання орієнтоване на науковців, викладачів, аспірантів, студентів, а також науково-практичних працівників і фахівців відповідних галузей промисловості.

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:
01011, м. Київ, вул. Мала Шияновська, 2, корп. 1, к. 1-347
тел./факс: +38 (044) 256-21-39
e-mail: **vistnuk@knutd.edu.ua; http://vistnyk.knutd.edu.ua/**

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету технологій та дизайну, протокол № 5 від 22.11.2023 р.

Матеріали друкуються мовою оригіналу. Відповідальність за переклад, достовірність фактів, цитат, власних імен, географічних назв, назв підприємств, організацій, установ та іншої інформації несуть автори статей. Передруки та переклади статей дозволяються лише за згодою автора (-ів) та редакції.

© Київський національний університет технологій та дизайну, 2023

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

TECHNOLOGIES AND ENGINEERING

Issue 6(17), 2023
DOI:10.30857/2786-5371.2023.6

Scientific Specialized Edition

Issued: 6 times a year

Founded: December, 1999

Kyiv 2023

The owner of «Technologies and Engineering» ***is***
KYIV NATIONAL UNIVERSITY OF TECHNOLOGIES AND DESIGN
This Scientific Specialized Journal is the successor of the edition "Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design", which in turn was the legal successor of the edition «Proceedings of Higher educational establishments. Technology of the light industry», which was published by Kiev Technological Institute of Light Industry from March, 1958 (USSR).

№ 6(17), 2023

The state registration of print media is КВ № 24822-14762 ПР, originating date 19.04.2021

License for publishing activity is ДК №993, originating date 24.07.2002

The journal is listed & reregistered in Higher Attestation Commission of Ukraine: №735 dated 29.06.2021 “Technologies and Engineering” in the list of professional publications: cat. B, technical specialties – 122, 131, 133, 151, 161, 132, 182, 141, 144, 171 (from 2018, 2020).

ISSN 2786-5371 print
ISSN 2786-538X online

The journal is registered in ISSN International Centre, Paris.

The journal is abstracted and indexed by Ulrich's Periodicals Directory, EBSCOhost, WorldCat, Index Copernicus, Research Bible, SJIF, PBN, JIF, OAJI, InfoBase Index, ISI, UIF, CiteFactor, Google Scholar, Crossref

Owner and Publisher:

Kyiv National University of Technologies and Design
Ukraine, 01011, Kyiv, 2, Mala Shyianovska Str.

Editor-in- Chief: **Igor V. Panasiuk -** Dr., professor

Deputy Editor: **Borys M. Zlotenko -** Dr., professor

Executive secretary: **Olena O. Kryvonos**

Scientific fields: Information technologies, electronics, mechanical and electrical engineering. Material science in the textile, clothing and footwear manufacturing industries. Chemical and biopharmaceutical technologies.

The journal is aimed at a wide range of researchers, professors, students, and graduate students and to bring the results of scientific research carried out under a variety of intellectual traditions and organizations of procedures to the attention of a specialized readership.

EDITORIAL OFFICE:
01011, Ukraine, Kyiv, 2, Mala Shyianovska Str., office 1-347
Tel./fax: +38 (044) 256-21-39
e-mail: **vistnuk@knutd.edu.ua; http://vistnyk.knutd.edu.ua/**

Recommendations from Science Council of Kyiv National University of Technologies and Design, Protocol № 5, originating date 22.11.2023.

Articles are published in the original language. The authors are responsible for the translation, authenticity of facts, quotations, proper names, geographic names, names of enterprises and other information.
The Editorial Office’s and author’s consent is needed prior to republishing or translating the articles.

© **Kyiv National University of Technologies and Design, 2023**

ISSN 2786-5371 print
ISSN 2786-538X online
Технології та інжиніринг, № 6(17), 2023

https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6

ВІДОМОСТІ ПРО ЧЛЕНІВ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ
наукового фахового журналу
«ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ»
"TECHNOLOGIES AND ENGINEERING"

Панасюк Ігор Васильович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *головний редактор* (ORCID: 0000-0001-6671-4266).
Злотенко Борис Миколайович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник головного редактора* (ORCID: 0000-0002-0870-8535).

СЕКЦІЯ: ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕЛЕКТРОНІКА, МЕХАНІЧНА ТА ЕЛЕКТРИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

Шведчикова Ірина Олексіївна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції*. ORCID: 0000-0003-3005-7385.
Стаценко Володимир Володимирович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*. ORCID: 0000-0002-3932-792X.

Білоус Інна Юріївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна. ORCID: 0000-0002-6640-103x.
Денисюк Сергій Петрович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна. ORCID: 0000-0002-2134-254X.
Жуйков Валерій Якович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна. ORCID: 0000-0002-3338-2426.
Мілих Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна. ORCID: 0000-0002-6176-3103.
Осипенко Володимир Васильович – доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна, 0000-0002-1077-1461.
Суходуб Ірина Олегівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». ORCID: 0000-0002-5895-1306.
Чорний Олексій Петрович – доктор технічних наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна. ORCID: 0000-0001-8270-3284.
Шавьолкін Олександр Олексійович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0003-3914-0812.
Andrzej Borusiewicz – D.Sc., Associate Professor, International University of Applied Sciences in Lomza, Poland, ORCID: 0000-0002-1407-7530.
Jasim Mohmed – Docent, PhD, Al-Furat Al-Awsat Technical University – Al-Musssaib Technical college, Kufa, Iraq. ORCID: 0000-0002-2983-416X.
Juraj Gerlici – Prof., Dr. Ing., University of Žilina, Slovak Republic. ORCID: 0000-0003-3928-0567.
Kateryna Kravchenko – PhD, University of Žilina, Slovak Republic. ORCID: 0000-0002-3775-6288.
Kay Berkling – Prof. Ph.D., Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW), Mosbach, Germany. ORCID: 0000-0003-1186-5678.
Miroslaw Skibniewski – Prof., Ph.D., Dr.h.c., Honor. Prof., Department of Civil & Environmental Engineering A. James Clark School of Engineering University of Maryland, College Park, USA, ORCID: 0000-0002-7102-753X.

ISSN 2786-5371 print
ISSN 2786-538X online
Технології та інжиніринг, № 6(17), 2023

https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6

СЕКЦІЯ: МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ІНДУСТРІЇ МОДИ, ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ТЕКСТИЛЮ, ОДЯГУ ТА ВЗУТТЯ

Галавська Людмила Євгеніївна – доктор технічних наук, професор, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції* . ORCID: 0000-0002-6994-6641.
Арабулі Світлана Іванівна – кандидат технічних наук, доцент, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції*. ORCID 0000-0003-1049-8255 -

Гараніна Ольга Олександрівна – доктор технічних наук, професор, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0002-4715-3851.
Кизимчук Олена Павлівна – доктор технічних наук, професор, Дрезденський технічний університет, Німеччина. ORCID: 0000-0002-8874-8931.
Очеретна Лариса – PhD, доцент, Ліберецький технічний університет, Чеська республіка. ORCID: 0000-0003-4296-410X.
Первая Наталія Володимирівна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0002-5086-3926.
Редько Яна Володимирівна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0001-7284-6898.
Славінська Алла Людвигівна – доктор технічних наук, професор, Хмельницький національний університет, Україна. ORCID: 0000-0003-0663-9422.
Хімічева Анна Іванівна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0002-3737-7341.

СЕКЦІЯ: ХІМІЧНІ ТА БІОФАРМАЦЕВТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Плаван Вікторія Петрівна – доктор технічних наук, професор, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *відповідальний редактор секції.* ORCID: 0000-0001-9559-8962.
Мокроусова Олена Романівна – доктор технічних наук, професор, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна – *заступник відповідального редактора секції.* ORCID: 0000-0003-1943-8048.

Андреєва Ольга Адіславівна – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0001-8374-2306.
Бессарабов Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0003-0637-1729.
Іщенко Олена Володимирівна – доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, ORCID: 0000-0002-9510-6005.
Кузьмінський Євген Васильович – доктор хімічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна. ORCID: 0000-0002-5632-8297.
Левицький Володимир Євстахович – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», Україна. ORCID: 0000-0003-1323-1943.
Савченко Богдан Михайлович – доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0002-8636-5734.
Скорохода Володимир Йосипович – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», Україна. ORCID: 0000-0002-2352-5964.
Страшний Владислав Володимирович – доктор фармацевтичних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0002-9188-1821.
Хоменко Володимир Григорович – доктор технічних наук, доцент, Лауреат Національної премії України імені Бориса Патона, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна. ORCID: 0000-0003-0013-8010.
Valeika Virgilijus – professor, PhD, Department of Physical and Inorganic Chemistry, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania. ORCID: 0000-0003-4974-7626.

ЗМІСТ

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕЛЕКТРОНІКА, МЕХАНІЧНА ТА ЕЛЕКТРИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

1. **Дерев'янко Д. Г., Шовкалюк М. М.**
Формування soft skills у студентів енергетичних спеціальностей шляхом впровадження у навчальний процес активних методів навчання 9
2. **Мазін М. Ю., Оникієнко Ю. О.**
Особливості використання методів Хаффмана та RLE для стиснення зображень в системах на мікроконтролерах 21
3. **Манойленко О. П., Калініна К. Р., Лебеденко Ю. О., Дідик М. А.**
Інтелектуальні системи управління мехатронними системами типу "cobot" з використанням ML-технологій 31
4. **Павленко В. М., Курляк П. О., Воляник О. Ю.**
Проєктування системи керування механізмами зі змінним дисбалансом 41
5. **Поліщук А. О.**
Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера 53
6. **Шавьолкін О. О., Марченко Р. М.**
Удосконалення техніки розрахунку параметрів та управління гібридною фотоелектричною системою з акумулятором для самоспоживання локального об'єкту 76

ХІМІЧНІ ТА БІОФАРМАЦЕВТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

7. **Савченко Б. М., Сова Н. В., Хоменко В. Г., Слєпцов О. О., Булгаков Є. С., Слєпченко Р. Ю.**
Застосування адитивних технологій при створенні метаматеріалів з регульованими діелектричними властивостями 89
8. **Свістільнік Р. Ф., Патлун Д. В.**
Дослідження впливу температури на електропровідні властивості полімерних композитних покриттів 101
9. **Тарасенко Г. В., Гурковська О. В., Баула О. П., Салій О. О.**
Оцінка еквівалентності *in vitro* генеричного лікарського на основі алопурінолу у формі таблеток 110

TABLE OF CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES, ELECTRONICS, MECHANICAL AND ELECTRICAL ENGINEERING

1. **Derevianko D. H., Shovkaliuk M. M.**
Formation of the soft skills for students of energy specialties through the implementation of active learning methods into the educational process 9
2. **Mazin M. Yu., Onykiienko Yu. O.**
Peculiarities of using Huffman and RLE methods for image compression in microcontroller systems 21
3. **Manoilenko O. P., Kalinina K. R., Lebedenko Yu. O., Didyk M. A.**
Intelligent control systems of cobot-type mechatronic systems using ML technologies 31
4. **Pavlenko V., Kurliak P., Volianyk O.**
Designing a control system for mechanisms with variable imbalance 41
5. **Polishchuk A. O.**
Development of the cooling system of the screw extruder body of the 3D printer 53
6. **Shavolkin O. O., Marchenko R. M.**
Improving the technique for calculating the parameters and control of a hybrid photovoltaic system with battery for self-consumption of a local object 76

CHEMICAL AND BIOPHARMACEUTICAL TECHNOLOGIES

7. **Savchenko B. M., Sova N. V., Khomenko V. G., Slieptsov O. O., Bulhakov Ye. S., Slepchenko R. Yu.**
Application of additive technologies in the creation of metamaterials with adjustable dielectric properties 89
8. **Svistsilnik R. F., Patlun D. V.**
Study of the effect of temperature on the conductive properties of polymeric composite coatings 101
9. **Tarasenko H. V., Hurkovska O. V., Baula O. P., Saliy O. O.**
Assessment of *in vitro* equivalence of generic drug based on allopurinol in tablet form 110

https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.1

УДК 620.91: 621.31

ДЕРЕВ'ЯНКО Д. Г., ШОВКАЛЮК М. М.
Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Україна

ФОРМУВАННЯ SOFT SKILLS У СТУДЕНТІВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ У НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС АКТИВНИХ МЕТОДІВ НАВЧАННЯ

Наявність міжнародних зобов'язань України у сфері енергетичної та екологічної безпеки, необхідність виконання державних цільових програм з підвищення енергоефективності, муніципальних енергетичних планів розвитку потребує великої кількості кваліфікованих фахівців з відповідними професійними компетентностями.

Мета. *Підвищення якості навчання студентів енергетичних спеціальностей шляхом використання досвіду впровадження у навчальний процес студентів – енергоменеджерів активних методів навчання, які розвивають як професійні навички для вирішення спеціалізованих завдань розрахунку технічних та фінансово-економічних показників енергоефективних проєктів ("hard skills"), так і надпрофесійних компетентностей ("soft skills").*

Методика. *Дослідження включало аналіз ефективності впровадження активних методів навчання та навчально-рольових ігор для розвитку професійних компетенцій студентів енергетичних спеціальностей. Створення професійно-орієнтовних навчальних ситуацій сприяє формуванню комунікативно-особистісних компетенцій майбутніх фахівців в сфері енергоменеджменту та енергоаудиту.*

Результати. *Впроваджено в освітній процес підготовки студентів енергетичних спеціальностей активні методи навчання, а саме: ділові ігри, дебати, публічні виступи із захистом прийнятих технічних рішень, виїзні екскурсії на підприємства із проведенням досліджень і науково-практичних семінарів. Отримано досвід організації і проведення літньої школи англомовного спілкування для розвитку комунікаційної компетенції магістрів. Організовано навчання студентів за дуальною освітою на базі енергогенеруючих та енергопостачальних підприємств. Впроваджено навчально-рольові ділові ігри для студентів-енергоменеджерів в рамках вивчення вибіркових дисциплін.*

Наукова новизна. *На основі аналізу активних методів навчання зформульовано порядок та рекомендації до проведення трьох ділових ігор для студентів-енергоменеджерів у рамках вивчення окремих освітніх компонентів, впровадження яких сприятиме більш якісній підготовці студентів енергетичних спеціальностей.*

Практична значимість. *Розроблено, адаптовано та впроваджено ділові ігри та інші методи активного навчання у освітній процес студентів ОПП «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» в НН ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського. Впроваджені активні методи навчання в рамках двох освітньо-професійних програм підготовки студентів енергетичних спеціальностей першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти позитивно зарекомендували себе формуючи надпрофесійні компетентності ("soft skills").*

Ключові слова. *soft skills; ділова гра; енергоменеджмент; професійні компетенції.*

Вступ Відповідно до «Угоди про асоціацію між Україною та ЄС…» наша держава зобов'язалася імплементувати низку директив у галузі енергоефективності, зокрема Директиви 2012/27/ЄС «Про енергоефективність» [1] та 2010/31/ЄС «Про енергетичні характеристики будівель» [2]. Для зменшення енергозалежності шляхом управління енергоспоживанням на підприємствах і організаціях різного профілю, виконання цільових державних програм, відновлення об'єктів внаслідок повномасштабних військових дій з урахуванням сучасних вимог енергоефективності Україна потребує кваліфікованих фахівців з відповідними компетентностями. Таким чином, питання якісної підготовки студентів у сфері енергозбереження та енергоефективних технологій для України є надзвичайно актуальним [3].

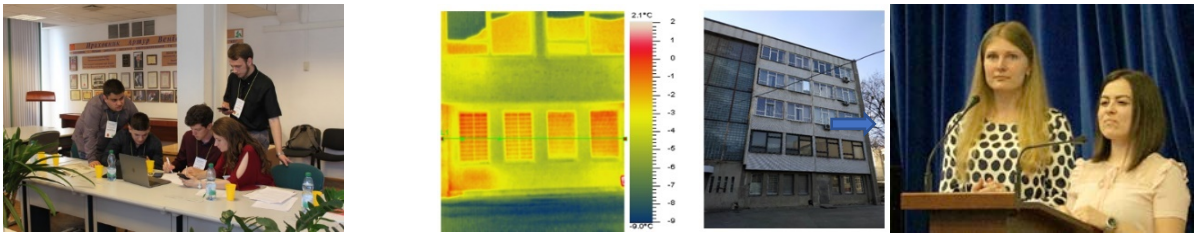
Перед майбутніми фахівцями у сфері енергоефективності в умовах постійної зміни нормативно-правової бази, розвитку міжнародних відносин стоять більш складні вимоги до реалізації професійного потенціалу, тому важливим завданням освітньої системи є постійне підвищення ефективності навчання, розвиток компетенцій і зростання зацікавленості студентів в опануванні фахових знань. У 2022 році виповнилося 25 років з моменту створення спеціальності «Енергетичний менеджмент» в Україні [4]. Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту (ННІ ІЕЕ) КПІ ім. Ігоря Сікорського було створено для підготовки студентів спеціальності «Енергетичний менеджмент» з метою проведення освітньої, наукової, методичної та інформаційної діяльності у галузі енергоефективності, енергоменеджменту та енергоаудиту [3, 4], тому напрацьований досвід запровадження активних методів навчання в освітньому процесі буде цікавим для широкого кола фахівців. У КПІ ім. Ігоря Сікорського заохочується впровадження різноманітних нестандартних форм викладання у навчальній практиці, зокрема ділові ігри [5–8], адже саме вони активізують розумову та творчу діяльність студентів різних технічних спеціальностей.

Постановка завдання: Підвищення якості навчання студентів енергетичних спеціальностей шляхом поглиблення існуючих підходів до розробки і впровадження активних форм навчання студентів енергетичних спеціальностей, у тому числі навчально-рольових ділових ігор, що дозволить студентам застосовувати отримані знання на практиці, розвинути професійні навички ("hard skills") і надпрофесійні компетентності ("soft skills").

Впровадження активних методів навчання в ННІ ІЕЕ

Кафедрою електропостачання ННІ ІЕЕ організовано формування та розвиток «soft skills» у студентів у освітньому процесі за рахунок введення активних методів навчання:

- дебати у рамках міжнародного співробітництва між університетами (рис. 1а);
- лекції стейкхолдерів із демонстрацією кращих практик;
- гостьові лекції професорів закордонних закладів освіти (у т.ч. іноземною мовою);
- семінари та публічні виступи із захистом прийнятих рішень (рис. 1б);
- виїзні екскурсії на підприємства із використанням лабораторної бази;
- дуальна освіта та програма подвійних дипломів;
- літня школа англомовного викладання;
- наукові гуртки;
- спільні науково-практичні дослідження магістрантів із провідними науковими організаціями України та в рамках міжнародної мобільності.



а б

а – Окфордські дебати між студентами ІЕЕ та Варшавської політехніки (принципи дебатів опираються на традиції британської Палати громад);
б – публічний захист студентами виконаних курсових проєктів з енергоаудиту школи в Солом'янському районі м.Києва (всього 97 закладів освіти та ОСББ за 2017–2019 рр.)

Рис. 1. **Формування soft skills у студентів: презентаційні навички, стресостійкість, мовлення іноземною мовою та ефективна комунікація**

Ділові ігри у навчальному процесі студентів-енергоменеджерів. Згідно із стандартом ДСТУ ISO 50001:2020 [9] енергоменеджмент – управлінська діяльність, що є

частиною загальної системи управління, що пропонує можливі шляхи покращення енергетичної ситуації; забезпечує та контролює раціональне та ефективне використання енергії; реалізовує потенціал енергозбереження. Тобто, напрям підготовки «Енергетичний менеджмент» поєднує теплотехнічну та електротехнічну підготовку з організаційно-управлінською [3, 4]. Майбутній фахівець крім професійних навичок виконання інженерних та економічних розрахунків повинен розвивати ще й додаткові компетенції: лідерські та творчі якості, стресостійкість, уміння працювати в команді, вести переговори, управляти часом, оцінювати наслідки прийнятих рішень та ін.

В НН ІЕЕ на кафедрі електропостачання за ОПП «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології» для формування й розвитку "soft skills" у рамках викладання окремих навчальних дисциплін проводяться ділові ігри. Нижче детальніше опишемо порядок проведення деяких з них.

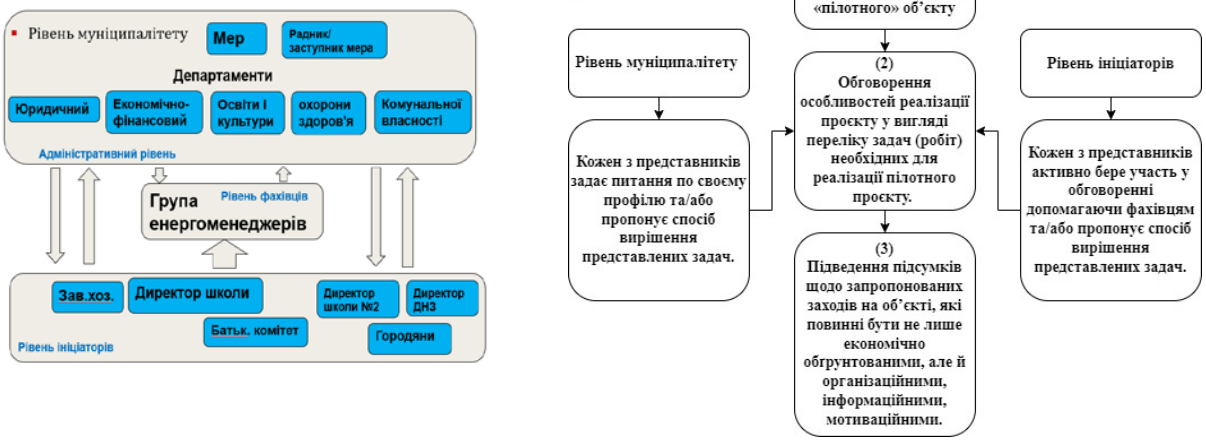
Ділова гра №1 «Впровадження політики енергозбереження на регіональному рівні».

Мета: під час «круглого столу» у мера міста обговорити проблеми і послідовність впровадження пілотного проєкту підвищення енергоефективності у навчальному закладі міста (наприклад, школи), яке знаходиться у процесі створення системи енергетичного менеджменту у своїй територіальній громаді.

На даній нараді присутніми є представники трьох рівнів (студенти діляться на 3 команди):

- рівень муніципалітету (адміністративний),
- рівень фахівців
- рівень ініціаторів та громадськість (рис. 2).

Схема взаємодії учасників гри



Примітка: ідея гри була початково взята та адаптована під навчальний процес з семінарів «Вступ до енергоменеджменту в територіальних громадах», що проводився в рамках співпраці КПІ ім. Ігоря Сікорського із німецьким товариством міжнародного співробітництва GIZ та Мінрегіонбудом України.

Рис. 2. **Схема взаємодії учасників та послідовність проведення ділової гри №1**

Головна ідея запровадження ділової гри №1: використання ділової гри, як методу імітації прийняття рішень спеціалістами (студентами). Група енергоменеджерів, аналізуючи існуючий стан і демонструючи фахові компетенції, пропонує проєкт підвищення енергоефективності на об'єкті (заклад освіти), що враховує заходи з оптимізації режимів роботи, пропозиції з модернізації обладнання, налагоджування моніторингу і контролю

енергетичних витрат, а також питання мотивація та підвищення інформованості демонструючи набуті в процесі навчання "hard skills". На початку гри слово надається представнику «команди енергоменеджерів», яка на основі отриманих знань під час вивчення відповідних дисциплін представляє перелік заходів для «пілотного» об'єкту (наприклад, школи) як першого кроку для побудови ефективної системи енергоменеджменту в місті. Далі слово надається представникам різних департаментів та інших учасників для з'ясування питань, що виникатимуть в ході обговорення, зокрема наступних:

- можливі джерела залучення коштів, статті витрат бюджету громади;
- економічне обґрунтування розрахунків та планування витрат залежно від черговості проведення робіт;
- організація навчального процесу, проектних, будівельно-монтажних робіт (календарний план);
- підготовка технічних умов та проведення тендерів;
- вибір підрядників, проведення авторського та технічного нагляду;
- питання балансової належності (джерело/мережа/споживачі);
- дотримання вимог мікроклімату в окремих приміщеннях;
- експлуатаційні вимоги до інженерних мереж та режими навантаження;
- вимоги до обладнання і матеріалів, що рекомендуються до впровадження;
- мотивація співробітників, розподіл зон відповідальності виконавців, форми звітності;
- можлива участь громадськості та підвищення інформованості суспільства та ін.

В ході дискусії студенти неодмінно приходять до висновку, що побудова ефективної системи енергоменеджменту повинна супроводжуватися не тільки технічними економічно доцільними заходами на об'єкті, але й організаційними, інформаційними, мотиваційними [10]. В ході відтворюються ситуації професійного характеру і відбувається обговорення в діалоговому режимі; при цьому можуть виникати конфліктні ситуації, до вирішення яких залучаються різні «структурні підрозділи» і «залучені фахівці». Ділова гра як метод імітації прийняття рішень спеціалістами допомагає формувати наступні навички "soft skills":

- працювати в колективі та проводити переговори (навички ефективної комунікації);
- приймати рішення в нестандартних ситуаціях;
- брати на себе відповідальність за результат; передбачати зміни;
- творчий підхід до вирішення завдань та ініціативність.

Ділова гра №2 «Вибір заходів з підвищення енергоефективності в будівлях».

Мета: обрати найбільш доцільні для даного типу будівлі заходи та обґрунтувати критерій вибору. Гра здійснюється в три етапи:

- перший – метод мозкового штурму;
- другий – діалоговий режим в умовах інформаційної невизначеності, коли студенти здійснюють пошук рішень, імітуючи експлуатаційний стан та ситуацію на об'єкті;
- третій етап – шляхом індивідуального вибору заходів з обговоренням результатів.

Група об'єднується в три команди, кожна з яких отримує свій об'єкт дослідження, наприклад перша команда – дитячий садочок, друга – житлову будівлю, третя – громадську будівлю (навчальний корпус). В першій частині команди протягом 20 хвилин записують усі можливі заходи з енергозбереження щодо огороджувальних конструкцій, інженерних мереж та джерела генерації теплоенергії для даного типу будівлі (як капіталоємні, так і малозатратні, включаючи заходи організаційного і інформаційного характеру).

На другому етапі студенти, порадившись, із всього переліку заходів обирають п'ять найбільш раціональних з їх точки зору, при цьому викладач не обмежує їх у критерії вибору. В результаті одна команда може спиратися на економічні показники (термін окупності,

обмежена сума інвестицій тощо), а інша – на заходи нормативно-правового характеру. Так, зокрема, для житлової будівлі першим кроком студенти можуть вказати створення ОСББ з метою подальшого залучення коштів за програмою «Енергодім» від Фонду енергоефективності (пакетом «Б» комплексна термомодернізація із компенсацією 70% витрат на енергоаудит та 50% на ремонтні роботи та обладнання). Наприкінці 2-го етапу представник від команди записує на дошці/плакаті 5 заходів як результат обговорення і публічно обґрунтовує їх для даного типу будівлі.

Третім етапом гри є індивідуальний вибір студентами трьох найбільш раціональних на їх погляд заходів для будівель в командах своїх колег. Таким чином, наприкінці можна підсумувати результати і оголосити результати «експертної думки». Під час кінцевого обговорення викладач повинен звернути увагу студентів на те, що пакет заходів, що пропонується, завжди обирається шляхом техніко-економічних розрахунків, спираючись на реальну ситуацію на об’єкті та умов його експлуатації.

Послідовність проведення гри наведено нижче на рис. 3.

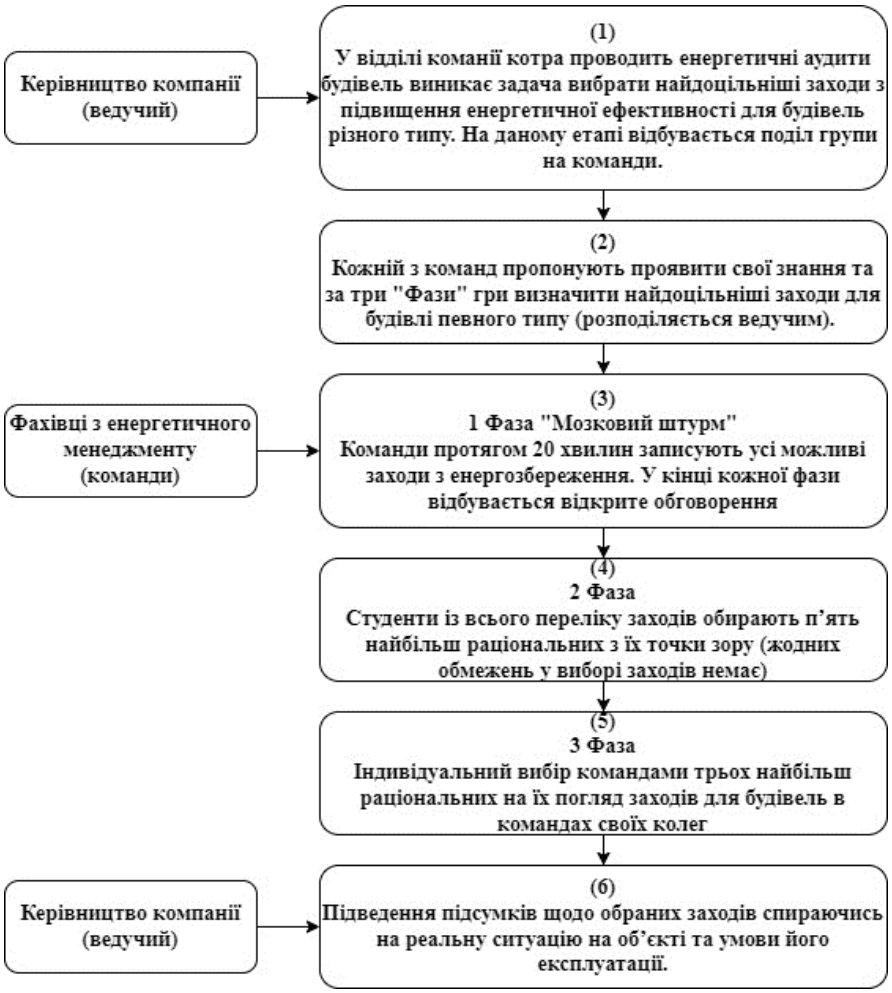


Рис. 3. **Послідовність проведення ділової гри №2**

Ділова гра №2 допомагає формувати низку навичок «soft skills», серед яких:
- здійснювати пошук та використання інформації;
- уміння плідно спілкуватися і брати відповідальність за роботу членів команди;
- ораторська майстерність та публічні виступи;
- здатність розв’язувати спеціалізовані задачі під час роботи енергоаудитора.

Під час проведення ділової гри відбувається моделювання практичної професійної діяльності енергоаудитора в сфері житлово-комунального господарства з використанням наявних знань, вдосконалюються комунікативні компетентності.

Ділова гра №3 «Розробка програми підвищення енергоефективності».

Мета: формулювання командами «портфелю інвестиційних проєктів» із виконанням техніко-економічних розрахунків з метою отримання найбільшої економії коштів при однакових початкових інвестиціях із горизонтом проєктування 15 років.

Можливі варіанти (залежно від освітньої компоненти в рамках якої імплементовано дану гру):

- 1 варіант гри: промислове підприємство з енергоємним обладнанням та джерелами енергії. Особливість – підвищення енергоефективності виробничих процесів та промислового обладнання;
- 2 варіант гри: заклад охорони здоров'я з будівлями різного призначення та інженерними мережами. Особливість – врахування при виборі заходів вимог до мікроклімату, умов експлуатації інженерних мереж для будівель медичного та немедичного профілю.

Основні ідея: на підприємстві/організації виникла необхідність впровадження системи енергоменеджменту. На посади членів команди енергоменеджерів є декілька претендентів. Група студентів ділиться на 2–3 команди і кожна повинна запропонувати бізнес план, який буде включати заходи з енергозбереження, що дозволять зекономити найбільшу кількість грошових коштів впродовж наступних 15 років. Гра грається у три фази, кожна з яких охоплює 5 років (рис. 4). Як вихідну інформацію студенти отримують обсяг і структуру споживання енергії на підприємстві, та перелік можливих технічних заходів для впровадження із необхідними інвестиціями, розмір економії при цьому потрібно розрахувати залежно від виду енергії/ресурсу. Наприкінці 3 фази проводиться порівняння економічних результатів для кожної групи, на основі якого робиться висновок про працевлаштування однієї з команд.

На початку першої фази до впровадження обов'язковими є 2 ігрові картки із переліком необхідних витрат на: 1) впровадження системи енергоменеджменту; 2) система обліку і моніторингу. Далі команді видається картка з графіком навантаження даного підприємства, даними по тарифам та структурі споживання енергії на різні потреби, виходячи з яких кожна з команд повинна запропонувати свої заходи з переліку карт, що пропонуються ведучим.

Команда може запропонувати до впровадження будь-яку кількість заходів, на які вистачить коштів. Перша фаза закінчується, коли кількість проектів до впровадження сформована. Далі починається розрахунок економічних показників по проектам для переходу у фазу № 2 (таким чином студенти демонструють засвоєні в процесі навчання «hard skills»). Далі для оцінювання економічної привабливості проєкту обчислюються наступні показники:

- простий термін окупності:

$$PBP = \frac{I_o}{CF}, \quad (1)$$

де I_o – початкові інвестиції (капітальні витрати), грн;
CF – чиста річна економія, грн/рік;

- дисконтований термін окупності (DPP):

$$DPP = \sum_{t=1}^{n} \frac{CF_t}{(1+i)^t} \geq I_o, \quad (2)$$

де n – горизонт планування (часовий горизонт дії проєкту), років;
t – порядковий номер періоду;
i – ставка дисконування;
CF_t – чистий грошовий потік за період t, грн;

- чиста приведена вартість (net present value – NPV):

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} - I, \quad (3)$$

де B_t – заощадження за проектом у t-му році;

C_t – витрати за проєктом; при цьому коефіцієнт дисконтування для кожного року визначається за формулою:

$$k_i = \frac{1}{(1+i)^n}; \quad (4)$$

- індекс дохідності (найбільший PI вказує на найбільш прибутковий захід, тому його можна застосовувати при ранжуванні заходів всередині проекту):

$$PI = \frac{NPV}{I}; \quad (5)$$

- внутрішня норма дохідності IRR (якщо IRR>i, проєкт приймається, в іншому випадку – відхиляється; найбільш привабливими є ті проєкти, у яких IRR є максимальною).

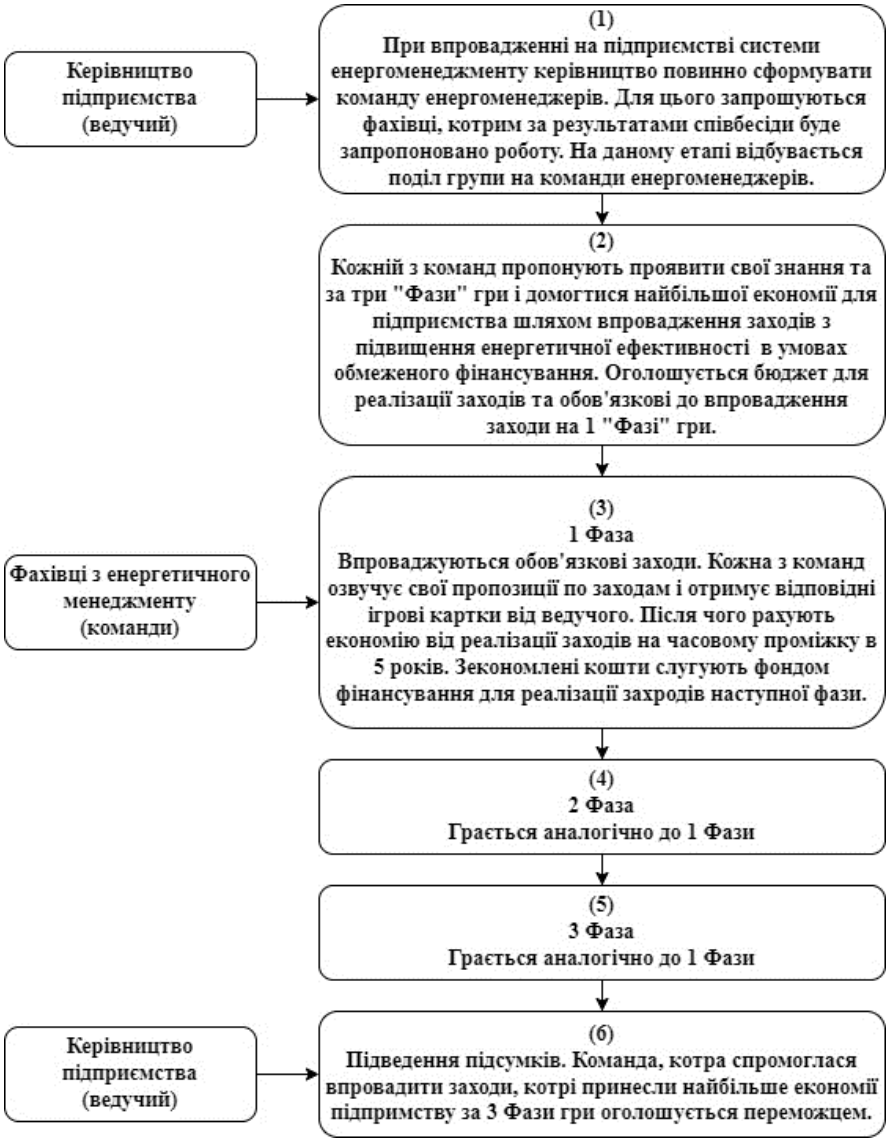
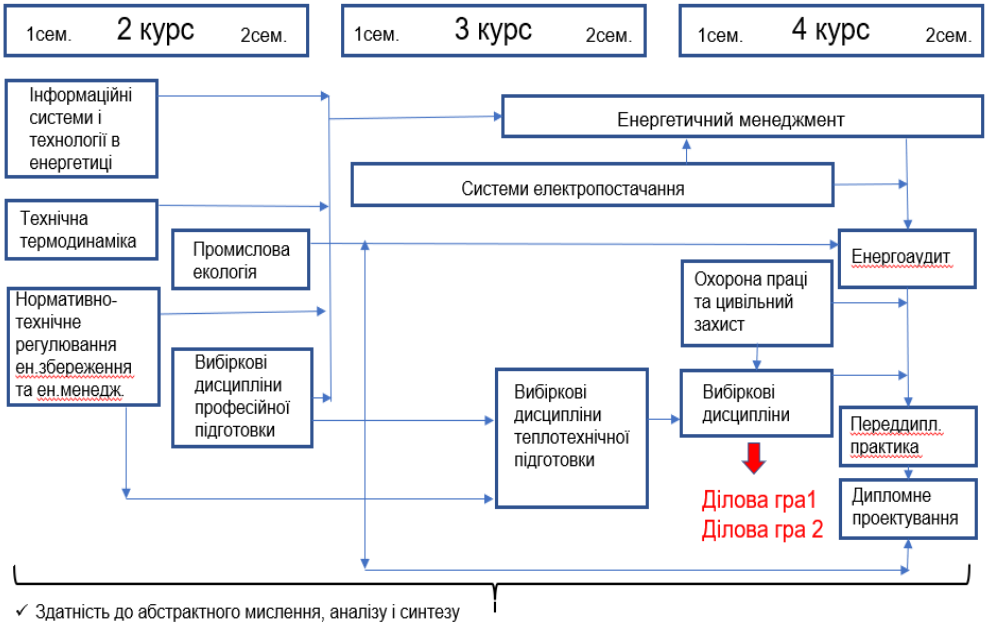


Рис. 4. **Послідовність проведення ділової гри 3**

а



- ✓ Здатність до абстрактного мислення, аналізу і синтезу
- ✓ Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях
- ✓ Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел
- ✓ Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми
- ✓ Здатність працювати в команді
- ✓ Здатність виконувати професійні обов'язки із дотриманням вимог правил техніки безпеки, охорони праці, виробничої санітарії та охорони навколишнього середовища
- ✓ Здатність складати калькуляції робіт в області енергоменеджменту та енергетичного аудиту, розробляти техніко-економічне обґрунтування заходів з енергоефективності
- ✓ Здатність об'єктивно оцінювати можливі позитивні і негативні соціальні, економічні, екологічні та технічні наслідки прийнятих рішень в системі енергетичного менеджменту

б

- ✓ Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел
- ✓ Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях
- ✓ Здатність приймати обґрунтовані рішення
- ✓ Здатність виявляти та оцінювати ризики
- ✓ Здатність працювати автономно та в команді
- ✓ Здатність виявляти зворотні зв'язки та корегувати свої дії з їх врахуванням
- ✓ Здатність керувати проектами і оцінювати їх результати
- ✓ Здатність володіти сучасними методами енергоаудиту будівель та процесів, оцінювати потенціал енергозбереження будівель та процесів, планувати впровадження заходів з енергоефективності, а також впроваджувати енергоефективні технології

Рис. 5. **Формування загальних і фахових компетентностей здобувача шляхом впровадження ділових ігор у навчальний процес: а – перший (бакалаврський) рівень вищої освіти; б – другий (магістерський) рівень вищої освіти**

Фази 2 та 3 граються аналогічно до першої; величиною наступних інвестицій є не використані фінансові ресурси та кошти, отримані від реалізації проектів в попередніх фазах. Методи, що ґрунтуються на дисконтуванні грошових потоків (discounted cash flow – DCF), потребують застосування спеціальних знань та аналітичних здібностей.

Приклад отриманого пакету запропонованих заходів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Пакети рекомендованих заходів з енергозбереження

№	Найменування	Інвес-тиції, грн	Чиста економія		PBP, років	DPP, років	NPV	PI
			кВт·год/рік	грн/рік				
1	модернізація внутрішнього/ зовнішнього освітлення							
2	використання частотно-регульованого приводу для електродвигунів насосів							
3	утеплення паро- конденсато-проводів на естакаді							
4	рекуперація теплоти у вентиляційних системах							
5	утилізація скидного тепла від компресорного обладнання							
6	модернізація котельні							
7	термомодернізація виробничої будівлі та ін.							

Таким чином, впровадження ділової гри №3 сприяє як засвоєнню професійних навичок для вирішення спеціалізованих завдань розрахунку фінансово-економічних показників енергоефективних проєктів, так і формуванню надпрофесійних компетенцій (soft skills). Зокрема, групова вправа розвиває навички управління часом, працювати в колективі, вирішувати завдання нестандартно і виробляти послідовність рішень для отримання кращого результату (найбільший економічний ефект від пакету заходів в межах виділених коштів).

На рис. 5 показано взаємозв’язок навчальних дисциплін, в ході вивчення яких студенти набувають необхідних знань для виконання наведених в публікації ділових ігор і перелік загальних і фахових компетентностей відповідно ОПП «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології», що забезпечується при цьому.

Висновки. На основі аналізу активних методів навчання зформульовано порядок та рекомендації до проведення трьох ділових ігор для студентів-енергоменеджерів у рамках вивчення окремих освітніх компонентів. Описано досвід впровадження активних методів навчання, що впроваджено в навчальні дисципліни студентів Навчально-наукового Інституту енергозбереження та енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського для ОПП «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології», який підтверджує підвищення якості підготовки студентів енергетичних спеціальностей. В даній публікації наведено рекомендації до проведення ділових ігор, що сприяють розвитку як професійних навичок ("hard skills"), так і надпрофесійних компетентностей ("soft skills"), що робить майбутнього фахівця-енергетика більш конкурентоспроможним у галузі.

References

1. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council on energy efficiency. *Official Journal of the European Union,* 14 November 2012, L 315, P. 1–56.

2. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Communities*, 2010, L153, P. 13–35.

3. Denysiuk, S., Shovkaliuk, M. (2023). KPI na shliakhu formuvannia enerhoefektyvnoho suspilstva. 25-richnyi dosvid [KPI is on the way to forming an energy-efficient society. 25 years of experience]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia – Energy: economy, technologies, ecology*, No. 1, P. 7–21 [in Ukrainian].

4. NN Instytut enerhozberezhennia ta enerhomenedzhmentu. 25 rokiv stanovlennia ta rozvytku: naukovo-informatsiine vydannia [SE Institute of Energy Saving and Energy Management. 25 years of formation and development: scientific and informative publication]. Kyiv: KPI, 2022. 416 p. [in Ukrainian].

5. Haidenko, Yu. O., Serheieva, O. O. (2022). Dilova hra yak diievyi zasib rozvytku soft skills [Business game as an effective means of developing soft skills]. *Materialy II mizhnar. nauk. konf. "Mizhhaluzevi dysputy: dynamika ta rozvytok suchasnykh naukovykh doslidzhen" – Materials of the II International scientific conf. "Interdisciplinary disputes: dynamics and development of modern scientific research"* (International Center for Scientific Research, Rivne, 09.09.2022). Vinnytsia. P. 111–115 [in Ukrainian].

6. Haidenko, Yu., Bondarenko, O. (2023). Dilova hra yak zasib rozvytku soft skills u protsesi navchannia inozemnii movi profesiinoho spriamuvannia [Business game as a means of developing soft skills in the process of learning a foreign language of professional direction]. *Aktualni pytannia humanitarnykh nauk – Current issues of humanitarian sciences*, Vol. 59, Tom 1, P. 262–268 [in Ukrainian].

7. Tsarehradska, K. V. (2012). Vykorystannia navchalno-rolovykh ihor dlia rozvytku inshomovnoi komunikatyvnoi kompetentsii studentiv-mahistriv ekonomichnykh spetsialnostei [The use of educational role-playing games for the development of foreign language communicative competence of master's students of economic specialties]. *Visnyk NTUU KPI – Bulletin of NTUU KPI*, Vol. 1, P. 150–153.

8. Velychko, O. M., Zorenko, O. V., Rozum, T. V., Skyba, V. M., Khmiliarchuk, O. I. (compilers) (2020). Dilova hra "Proiekt": navch. posibnyk z dystsypliny "Proiektuvannia vydavnycho-polihrafichnoho vyrobnytstva" za spets. 186 – Vydavnytstvo ta polihrafiia [Business game "Project":

Література

1. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council on energy efficiency. *Official Journal of the European Union.* 14 November 2012. L 315. P. 1–56.

2. Directive 2010/31/eu of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Communities.* 2010. L153. P. 13–35.

3. Денисюк С. П., Шовкалюк М. М. КПІ на шляху формування енергоефективного суспільства. 25-річний досвід. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2023. № 1. С. 7–21.

4. НН Інститут енергозбереження та енергоменеджменту. 25 років становлення та розвитку: науково-інформаційне видання. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2022. 416 с.

5. Гайденко Ю. О., Сергеєва О. О. Ділова гра як дієвий засіб розвитку soft skills. *Матеріали II міжнар. наук. конф. "Міжгалузеві диспути: динаміка та розвиток сучасних наукових досліджень"* (Міжнародний центр наукових досліджень, Рівне, 9 вересня 2022). Вінниця, 2022. С. 111–115.

6. Гайденко Ю., Бондаренко О. Ділова гра як засіб розвитку soft skills у процесі навчання іноземній мові професійного спрямування. *Актуальні питання гуманітарних наук*. 2023. Вип. 59, Том 1. С. 262–268.

7. Цареградська К. В. Використання навчально-рольових ігор для розвитку іншомовної комунікативної компетенції студентів-магістрів економічних спеціальностей. *Вісник НТУУ "КПІ"*. 2012. Вип. 1. С. 150–153.

8. Ділова гра "Проєкт": навч. посібник з дисципліни "Проєктування видавничо-поліграфічного виробництва" за спец. 186 – Видавництво та поліграфія. Уклад.: О. М. Величко, О. В. Зоренко, Т. В. Розум,

education manual on the discipline "Designing publishing and printing production" according to special. 186 – Publishing and printing]. Kyiv: KPI. 34 p. [in Ukrainian].
9. DSTU ISO 50001:2020 Systemy enerhetychnoho menedzhmentu. Vymohy ta nastanova schodo vykorystannia [Energy management systems. Requirement and guideline for use] (ISO 50001:2018, IDT). Kyiv, DP "UkrNDNTs", 2020. 33 p. [in Ukrainian].
10. Shevchenko, O. M., Shovkaliuk, M. M. (2021). Kontseptsiia rozrobky ta realizatsii prohramy enerhoefektyvnosti zakladu vyschoi osvity na prykladi KPI [The concept of development and implementation of the energy efficiency program of a higher education institution based on the example of KPI]. *Enerhetyka i avtomatyka* = *Energy and automation*, No. 4, P. 49–62 [in Ukrainian].

В. М. Скиба, О. І. Хмілярчук. К.: КПІ, 2020. 34 с.

9. ДСТУ ISO 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2018, IDT). Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2020. 33 с.
10. Шевченко О. М., Шовкалюк М. М. Концепція розробки та реалізації програми енергоефективності закладу вищої освіти на прикладі КПІ. *Енергетика і автоматика*. 2021. № 4. С. 49–62.

DEREVIANKO DENYS
PhD, Ass. Professor
Educational and Scientific Institute of Energy Saving and Energy Management National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-4877-5601
Scopus Author ID: 57190414985
Researcher ID: I-4229-2018
E-mail: Dereviankodenys@gmail.com

SHOVKALIUK MARYNA
PhD, Ass.Professor
Educational and Scientific Institute of Energy Saving and Energy Management National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
http://orcid.org/0000-0002-1898-3493
Scopus Author ID: 57220179453
Researcher ID: K-5822-2017
E-mail: madam.mari@gmail.com

DEREVIANKO D. H., SHOVKALIUK M. M.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

FORMATION OF THE SOFT SKILLS FOR STUDENTS OF ENERGY SPECIALTIES THROUGH THE IMPLEMENTATION OF ACTIVE LEARNING METHODS INTO THE EDUCATIONAL PROCESS

Ukraine's international obligations in the field of energy and environmental security, the need to implement state programs on the energy efficiency increase and municipal energy development plans requires a large number of qualified specialists with relevant professional competencies.

Purpose of the study. *Improvement of the quality of education of students of energy specialties by using the experience of implementation of active learning methods which develop both professional skills for solving specialized tasks of calculating technical and economic indicators of energy-efficient projects ("hard skills"), and extra-professional competencies ("soft skills") into the educational process of energy management students.*

Methodology. *The study included an analysis of the effectiveness of the implementation of active learning methods and educational role-playing games for the development of professional competencies of students of energy specialties. The creation of professional-oriented educational situations contributes to the formation of communicative and personal competencies of future specialists in the field of energy management and energy audit.*

The results. *Active learning methods have been implemented into the educational process for students of energy specialties, namely: business games, debates, public speeches with the defense of adopted technical decisions, field trips to enterprises with conducting research and scientific-practical seminars. The experience of organizing and conducting a summer school of English language communication for the development of communication competence of master students was obtained. Training of dual education students on the basis*

of energy-generating and energy-supplying enterprises is organized. Educational role-playing business games have been implemented for energy management students as part of the study of elective disciplines.

Scientific novelty. *Based on the analysis of active learning methods, the procedure and recommendations for implementation of three business games for energy management students as part of the study of individual educational components, have been formulated. The implementation of which will contribute to higher quality training of students of energy specialties.*

Practical value*. Business games and other methods of active learning were developed, adapted and implemented in the educational process of students of the "Energy Management and Energy-Efficient Technologies" educational programs at the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. The implemented active learning methods within the framework of two professional educational programs for students of energy specialties of the first (bachelor) and second (master) levels of higher education have positively proven themselves by forming students' extra-professional competencies ("soft skills").*

Keywords: *soft skills; business game; energy management; professional competencies.*

https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.2

УДК 621.382

МАЗІН М. Ю., ОНИКІЄНКО Ю. О.
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ХАФФМАНА ТА RLE ДЛЯ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ В СИСТЕМАХ НА МІКРОКОНТРОЛЕРАХ

***Мета**: Дослідження ефективності використання методів стиснення RLE та Хаффмана для стиснення зображень з урахуванням обмежених ресурсів мікроконтролерів і, відповідно необхідності зменшення часу передачі зображення та зменшення витрат енергії в бездротових сенсорних мережах.*

***Методика**: Експериментальне дослідження ступеня стиснення зображень з використанням методів Хаффмана та RLE, реалізованих програмно для мікроконтролерного модулю ESP32-CAM з вбудованою камерою. Оцінка та порівняння ступеню стиснення зображень, виконаного за допомогою алгоритмів Хаффмана та RLE.*

***Результати**: Створено програмний модуль для реалізації алгоритмів стиснення Хаффмана та RLE на мікроконтролері ESP32-CAM. Досліджена ефективність використання алгоритмів Хаффмана та RLE, для стиснення зображень, використовуючи обмежені ресурси мікроконтролера, порівняна ефективність стиснення та розміри стиснених файлів. В результаті досліджень встановлено, що метод RLE показав низьку ефективність стиснення зображень (менше 1%) у порівнянні з методом Хаффмана, який забезпечив ступінь стиснення для вибраного зображення 11%. Попереднє використання вейвлет перетворення Хаара позитивно пливає на результати стиснення для обох досліджених методів: для RLE ступінь стиснення зріс до 16%, Хаффмана до 31% без втрат якості зображення. Для порівняння використано метод JPEG, який забезпечує ступінь стиснення того ж зображення до 70%, однак з втратою якості зображення.*

***Наукова новизна**: Виконано аналіз ефективності стиснення даних за допомогою методів Хаффмана та RLE, реалізованих з урахуванням обмежених обчислювальних можливостей 32-х бітних мікроконтролерів з використанням додаткової зовнішньої пам'яті. Досліджено вплив вибору методу на час обробки зображень та кількість задіяної пам'яті.*

***Практична значимість**: Створено програмне забезпечення, яке реалізує алгоритми стиснення даних Хаффмана та RLE. Підтверджена доцільність використання наведених методів в системах на 32-х бітних мікроконтролерах для зменшення споживання енергії при виконанні перетворень і передачі зображень, що дає змогу подовжити термін служби батареї сенсорного вузла. При цьому досліджені алгоритми для стиснення зображення можуть забезпечити якість вихідного зображення з найменшими можливими втратами даних.*

***Ключові слова**: стиснення зображення; метод Хаффмана; метод RLE; Run-length encoding.*

Вступ. У наш час бездротові сенсорні мережі (WSN) мають широке коло сфер застосування. Це і моніторинг навколишнього середовища, промисловий моніторинг, розумне сільське господарство, спостереження та відстеження об'єктів, автоматизація процесів, моніторинг здоров'я та багато інших застосувань. Базовою одиницею WSN є вузли, які спілкуються один з одним за допомогою бездротових технологій і можуть бути, як самоорганізованими, так і керованими через базові станції або шлюзи. Кожен вузол має у складі мікроконтролер або мікропроцесор, який отримує інформацію з датчиків, обробляє цю інформацію і передає її через бездротовий канал зв'язку. Для забезпечення живлення вузла зазвичай використовується акумулятор. Найбільше енергії споживається в процесі передачі даних, що важливо враховувати через обмежену ємність акумуляторів. Одним із можливих рішень, що можуть призвести до економії енергії, це зменшення обсягу даних, що передаються між вузлами сенсорної мережі. Зменшення обсягу даних можна досягти використанням

ефективної техніки їх стиснення. Тому удосконалення методів та алгоритмів стиснення даних наразі є активним напрямком досліджень [5].

Вузли сенсорних мереж мають певні обмеження по споживаній енергії, і відповідно продуктивність мікроконтролера та його пам'ять теж обмежені. Тому для стиснення даних використовують методи, що потребують відносно невеликих затрат мікроконтролерних ресурсів з одного боку і забезпечують достатній ступінь стиснення даних. На сьогодні до найбільш вживаних можна віднести такі методи як Run Length Encoding (RLE) та стиснення Хаффмана (Huffman) та їх модифікації.

Метод стиснення RLE та його модифікації типу K-RLE використовують в сенсорних мережах в першу чергу орієнтуючись на можливості мікроконтролера. Модифікація варіанту метода K-RLE під назвою C-RLE, запропонована в [1] і спроектована саме з урахуванням особливостей мікроконтролерів Cortex-M3. Алгоритм K-RLE, реалізований у WSN, забезпечує компроміс між споживанням енергії та ефективністю стиснення. Експериментальні результати показали, що запропонований підхід зменшує час обробки та зменшує споживання енергії під час стиснення, зберігаючи однаковий коефіцієнт стиснення K-RLE. Апаратна платформа вузла WSN базується на мікроконтролері STM32L1xx на базі ARM Cortex-M3. Запропонований метод стиснення даних C-RLE забезпечує зниження споживання енергії в процесі стиснення на 30% у порівнянні з K-RLE.

Стиснення Хаффмана також використовується у бездротових сенсорних мережах. Наприклад, у випадку, коли мережа містить велику кількість вузлів на обмеженій площі. В силу близького розташування вузли оперують схожими даними, що призводить до надмірного споживання енергії та може спричиняти втрату пакетів даних. В таких випадках для збору інформації використовують спеціальний протокол LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy). Додавання в алгоритм обробки стиснення Хаффмана дозволяє вирішити проблему [6]. Результати комп'ютерного моделювання показують ефективність запропонованого алгоритму та зниження енергоспоживання приблизно на 38% порівняно з LEACH протоколом без стиснення.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження особливостей використання методів RLE та Хаффмана у системах на 32-х бітних мікроконтролерах на прикладі стиснення зображення з відеокамери мікроконтролерного модулю ESP32-CAM для передачі через бездротовий канал зв'язку. Для досягнення мети необхідно здійснити захоплення та обробку зображення, стиснути його та оцінити вплив параметрів стиснення на розмір отриманого файлу. Під час експерименту необхідно також оцінити час виконання операції стиснення та об'єм задіяної оперативної пам'яті та пам'яті програм мікроконтролера.

Результати попередніх досліджень. На сьогодні метод RLE та його модифікації широко використовуються у комп'ютерних та вбудованих системах. В медичній галузі для збереження зображень використовується стандарт DICOM. Для стиснення таких зображень використовують техніку ентропійного кодування без втрат, щоб усунути надмірність зображення, зберігши його якість на достатньо високому рівні. RLE кодування – це основний метод ентропійного кодування, який використовується в зображеннях DICOM. В роботі [2] запропоновано метод паралельного RLE, який при використанні графічних процесорів дозволяє до 5-ти разів підвищити швидкість обробки зображень. Переваги та недоліки RLE кодування зображень розглянуто в [7], оцінена ефективність різних варіацій алгоритму RLE кодування, підкреслено, що ефективність стиснення зменшується для зображень з великою кількістю інформації в них. Ефективність використання RLE кодування на комп'ютері для стиснення аудіо файлів у порівнянні з методом динамічного стиснення Хаффмана оцінена в роботі [3]. В результаті ступінь стиснення забезпечувалась приблизно однакова, але перетворення Хаффмана виконувалось в десятки разів швидше. Таким чином, варто

підкреслити, що використання RLE кодування найбільш доцільне в системах з обмеженими обчислювальними ресурсами [1], а ефективність залежить від типу даних, що обробляються. Ефективність кодування збільшується у випадках наявності послідовностей незмінних даних.

Класичним використання кодування Хаффмана є стиснення зображень у форматі JPEG Однак стиснення Хаффмана має і інші модифікації та застосування. В роботі [4] виконано порівняльний аналіз стандартного та канонічного методів кодування Хаффмана. Встановлено, що ступінь стиснення канонічного кодування Хаффмана кращий, ніж у стандартного кодування Хаффмана, але оригінальність зображення краще зберігається в методі стандартного кодування Хаффмана. Таким чином, реконструкція зображень із стисненого файлу призведе до більшої втрати даних у випадку канонічного кодування Хаффмана. В роботі [8] представлено модифікований метод кодування Хаффмана, який було застосовано до вагових коефіцієнтів нейронної мережі на прикладі декількох мереж. Такий підхід забезпечує максимальне стиснення нейронної мережі приблизно на 64 % і мінімальний час розпакування одного модуля 0,33 секунди, що важливо для мобільних платформ з обмеженим обсягом пам'яті. Порівняння кодування Хаффмана та подвійного кодування Хаффмана виконано в [9]. Автори прийшли до висновку, що подвійне кодування Хаффмана є більш ефективним методом стиснення, ніж кодування Хаффмана, оскільки надмірність у подвійному кодуванні Хаффмана менша. Але подвійне кодування вимагає більше часу.

Особливості стиснення даних за допомогою алгоритму RLE. Алгоритм RLE – це простий метод стиснення даних, який замінює повторювані символи на пари символ-кількість. Наприклад, рядок “AAAAABBBCCD” можна стиснути за допомогою RLE до “A5B3C2D1”. Математичну формулу алгоритму RLE можна записати так:

$$RLE(S) = \sum_{i=1}^{n} (s_i, c_i), \qquad ()$$

де S – вихідний рядок;
n – кількість унікальних символів в S;
s_i – і-й символ в S;
c_i – кількість його повторень.

Особливості стиснення даних за допомогою алгоритму Хаффмана. Алгоритм Хаффмана – це метод стиснення даних, який замінює символи на коди змінної довжини, залежно від їх частотності в повідомленні. Цей алгоритм гарантує оптимальність кодування, тобто мінімальну середню довжину коду для даного алфавіту. Математичну формулу алгоритму Хаффмана можна записати так:

$$L = \sum_{i=1}^{n} p_i l_i , \qquad (2)$$

де L – середня довжина коду;
n – кількість символів в алфавіті;
p_i – ймовірність появи і-го символу в повідомленні;
l_i – довжина коду і-го символу.

Алгоритм Хаффмана складається з двох етапів: побудови оптимального кодового дерева та побудови відображення код-символ на основі цього дерева. Основна ідея алгоритму полягає в тому, що об’єднуються два символи з найменшими ймовірностями в один новий символ з сумарною ймовірністю, і цей процес повторюється до тих пір, поки не залишиться один символ. Кожен крок об’єднання відповідає створенню нового вузла дерева, який має двох

потомків – об'єднані символи. Код кожного символу отримується шляхом проходження від кореня дерева до листка, що відповідає цьому символу, і запису біт 0 або 1 на кожному розгалуженні.

Для прикладу, нехай є наступна таблиця (табл. 1) частот повторення символів.

Таблиця 1

Таблиця частот повторення символів послідовності Хаффмана

Символ	A	B	C	D	E
Частота повторення	15	7	6	6	5

Застосовуючи алгоритм Хаффмана, отримуємо таке кодове дерево (рис. 1).

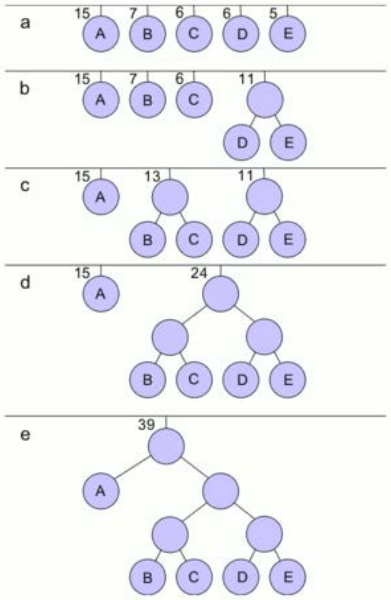


Рис. 1. **Вигляд кодового дерева для заданих частот повторення символів алгоритму Хаффмана**

Тоді коди кожного символу будуть такими як в табл. 2.

Таблиця 2

Таблиця з кодами Хаффмана для визначеної таблиці символів

Символ	A	B	C	D	E
Код	0	100	101	110	111

Опис апаратного та програмного забезпечення для дослідження алгоритмів стисненні зображень. Для обробки зображень часто використовують 32-х бітні мікроконтролери, що мають достатньо високі тактові частоти і відповідну продуктивність. Але захоплення та обробка зображень вимагає використання великих об'ємів оперативної пам'яті, якої недостатньо у більшості мікроконтролерів загального призначення. Підключення до мікроконтролера додаткової зовнішньої оперативної пам'яті з інтерфейсом SPI дозволяє цю проблему вирішити. Однак використання зовнішньої пам'яті знижує швидкість обробки зображень. Для експериментальних досліджень алгоритмів стиснення використано модуль ESP32-CAM [10], який складається з плати мікроконтролера з підключеною камерою та плати з USB інтерфейсом та колами живлення. На платі мікроконтролера використано двохядерний мікроконтролер ESP32 з мікропроцесорним ядром Tensilica Xtensa LX6 та вбудованим

каналом Wi-Fi, мікросхему пам'яті PSRAM об'ємом 4 Мбайта та 2-мегапіксельну камеру. Зображення передавались безпосередньо на web-сторінку в браузері, завдяки наявності у мікроконтролера ESP32 вбудованого Wi-Fi. Основні характеристики плати мікроконтролера:

- Роздільна здатність камери – 2 мегапікселі
- Максимальна частота тактового генератора – 240 МГц
- Об'єм оперативної пам'яті (внутрішня + зовнішня) – 4+0,5 Мбайт
- Об'єм пам'яті програм – 4 Мбайт

Зовнішній вигляд модулю ESP-CAM з підключеною камерою наведено на рис. 2.

Рис. 2. **Зовнішній вигляд модулю ESP32-CAM, камери та плати USB інтерфейсу**

Алгоритм RLE відомий як один з найпростіших алгоритмів архівації графіки. Такий алгоритм орієнтований на зображення з невеликою кількістю кольорів, що підходить при проведенні експерименту з чорно-білими зображеннями. До позитивних сторін алгоритму можна додати що він не вимагає додаткової пам'яті при архівації, а також швидко працює, що важливо при використанні мікроконтролерів з обмеженими обчислювальними ресурсами. При використанні алгоритму Хаффмана потрібно мати на увазі те, що об'єм задіяної оперативної пам'яті залежить від частоти повторення символів. Відповідно при реалізації алгоритму Хаффмана на мікроконтролері завжди має бути зарезервовано певний об'єм оперативної пам'яті.

Основною метою проведення експериментів було порівняти алгоритми стиснення Хаффмана та RLE, та оцінка доцільність їх використання для підвищення ефективності стиснення зображення з камери без втрати якості самого зображення. Чим більше ступінь стиснення, тим менше часу необхідно для того, щоб зображення було передано від мікроконтролера на інші пристрої. В ході проведення експерименту зображення з камери отримувалось з використанням функцій, що входять в бібліотеку по роботі з зображеннями для мікроконтролера ESP32-CAM [11]. Далі зображення оброблялось за допомогою двох реалізованих алгоритмів стиснення Хаффмана та RLE. З метою оцінки впливу складності змісту зображення та досягнення найбільшого ступеня стиснення зображень методами стиснення Хаффмана та RLE проведено експеримент з додатковою попередньою обробкою зображень з використанням перетворення Хаара. Експеримент по обробці зображень за допомогою перетворення Хаара на мікроконтролері ESP32 докладно описано в [12]. Для спрощення та прискорення процесу порівняння результатів створено html-сторінку, яка зберігалась у пам'яті мікроконтролера і на яку передавалось вихідне зображення та початковий та кінцевий розміру обробленого файлу.

В ході проведення експериментів досліджувалось наступне:

1. Тестування програмного коду, який реалізує методи стиснення Хаффмана та RLE для масиву даних з заданими значеннями, що повторюються.

2. Співвідношення розмірів оригінального та стисненого зображень, оброблених за допомогою методів Хаффмана та RLE. Експеримент виконувався для зображення розміром 96x96 пікселів.

3. Співвідношення розмірів оригінального та стисненого зображень, оброблених попередньо за допомогою перетворення Хаара, а потім методів Хаффмана та RLE. Експеримент виконувався для зображення розміром 96x96 пікселів.

4. Порівняння ефективності стиснення за допомогою методів Хаффмана та RLE, з попередньою обробкою зображення методом Хаара і без неї. Порівняння реалізованих методів з JPEG.

Аналіз результатів експерименту. Для усіх експериментів наведено наступні данні: використаний метод стиснення для зображення, а також відповідні наведеним даним значення ступеня стиснення, розміри файлів до стиснення та після, а також наведено час виконання.

Ступінь стиснення визначено в формулі (3) відповідно до [13]:

$$СтупіньСтиснення = \frac{(КількістьВхіднихДаних - СтисненийОбсягДаних)}{КількістьВхіднихДаних} * 100\% . \quad (3)$$

Таблиця 3

Результат виконання обробки тестових даних для дослідження роботи алгоритму

	Оригінальний розмір зображення, байт	Стиснений розмір зображення, байт	Ступінь стиснення, %	Час виконання, мс
Хаффман	9216	2305	74,98	19
RLE	9216	10	99,89	1

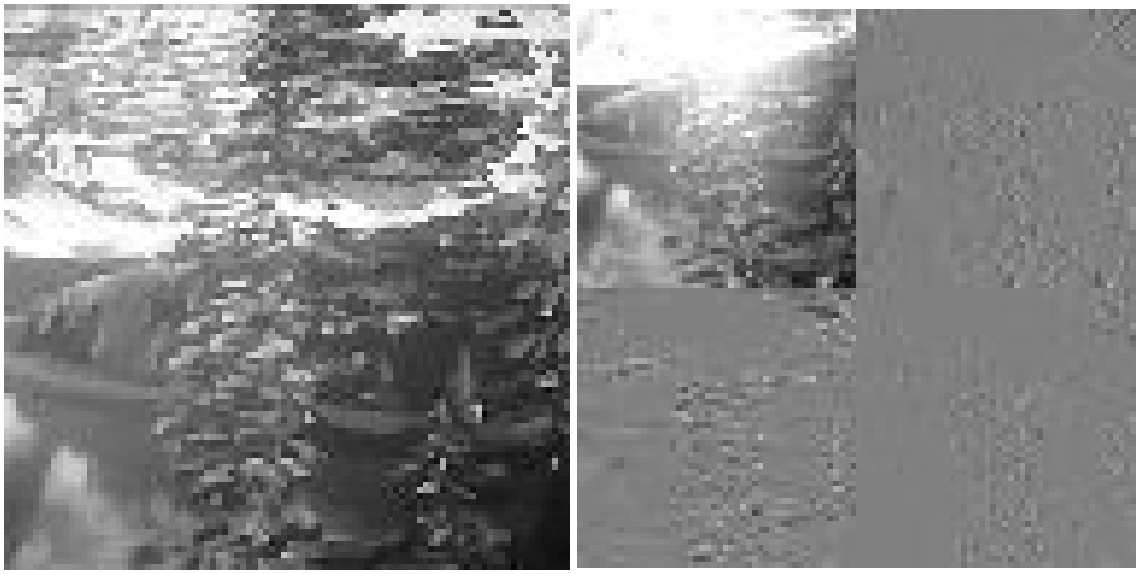
Результати тестування програмного коду реалізації методів стиснення Хаффмана та RLE наведені в таблиці 3. Для даного експерименту використовувався масив даних з двома числами, кожне з яких заповнювала половину тестового масиву. Як видно з таблиці 3, найкращий результат отримано для RLE, всього 0,1% оригінального зображення, оскільки на виході отримано лише 2 значення з їх кількісними значеннями, що в байтовому еквіваленті займає всього 10 байт. Для методу стиснення Хаффмана розмір вихідної зображення є набагато більшим за результати, отримані для стиснення RLE, і становить 2305 байт. Такі результати пояснюються тим, що алгоритм Хаффмана заміняє кожен піксель зображення на його закодоване значення, що заздалегідь обраховується та зберігається у таблиці частот.

Таблиця 4

Порівняння результатів стиснення зображення розміром 96x96 пікселів

	Оригінальний розмір зображення, байт	Стиснений розмір зображення, байт	Ступінь стиснення, %	Час виконання, мс	Кількість використаної флеш пам'яті, байт
Хаффман	9216	8192	11.11	18	1964
RLE	9216	9193	0.24	3	1144
Хаффман + вейвлет	9216	6402	30.53	96	3764
RLE + вейвлет	9216	7738	16.03	20	2088
JPEG	9216	2798	69.63	7	12020

Оцінка ефективності стиснення методів Хаффмана та RLE проводилась на зображенні розміром 96х96 пікселів, наведеному на рис. 3. Спершу оцінювалась ефективність стиснення самого зображення (рис. 3а), а потім ефективність стиснення вейлет перетворення вказаного зображення (рис. 3б). Результати експериментів по стисненню зображень за методами Хаффмана та RLE наведені в таблиці 4. Як видно з таблиці, розмір стисненого зображення методом RLE практично співпадає з оригіналом (менше на 0,2%). Такий результат пов'язаний з тим, що для отриманого з камери модуля ESP32-CAM зображення градації сірого складають неповторювані послідовності пікселів, що робить стиснення методом RLE неефективним. Метод Хаффмана показало кращу ефективність, порівняно з методом RLE. Розмір стисненого файлу менше розміру оригінального файлу на 11%, а ступінь стиснення не залежить критично від повторюваності пікселів, що є перевагою алгоритму Хаффмана.



а **б**

Рис. 3. **Досліджувані зображення: а) – оригінальне зображення з камери модулю ESP32-CAM, б) – зображення після використання перетворення Хаара**

Результати експерименту для зображення розміром 96х96 пікселів за допомогою методів стиснення Хаффмана та RLE з використанням перетворення вейвлету Хаара наведені в таблиці 4. Під час використання методу Хаффмана отримано результати стиснення на рівні 30%. Найкращі результати стиснення можна отримати для монотонних зображень, оскільки вони мають найбільш корельовані значення таблиці частот. Застосування методу RLE показало стиснення на рівні 16%, тобто попереднє вейвлет перетворення підвищує ефективність RLE стиснення. Можна припустити, що ступені стиснення зображень з чітко виділеними кольорами та монотонних зображень будуть близькими.

Щодо використання ресурсів мікроконтролера експеримент показав, що метод стиснення RLE використовує найменше флеш пам'яті обраного мікроконтролера. Це пояснюється тим, що метод RLE має значно простіший алгоритм у порівнянні з алгоритмом методу Хаффмана. Результати використання флеш пам'яті для обраних методів стиснення у поєднанні з вейвлетом Хаара показують схожі результати. Слід зазначити що у порівнянні з усіма протестованими методами, метод JPEG використовує на 8 024 байт більше оперативної пам'яті у порівнянні з іншими методами, оскільки зберігає перетворене зображення. Також JPEG використовує найбільше флеш пам'яті, оскільки алгоритм містить додаткове обробку

даних перед стисненням: розділення на блоки, дискретне косинусне перетворення, квантування та інші операції.

Варто зауважити, що JPEG перетворення має найменший час виконання, хоча також використовує метод Хаффмана для стиснення даних. Однак у випадку JPEG метод Хаффмана оперує набагато меншим об'ємом даних, завдяки попередньому квантуванню, тобто зменшенню масштабу даних. Відповідно операція стиснення займає менше часу.

Висновки. В результаті експериментальних досліджень визначено, що використання методів Хаффмана та RLE для обробки зображень, отриманих з камери мікроконтролера, з метою подальшої передачі в системі має свої переваги, а саме, дозволяє досягти певного ступеню стиснення зображень без втрати якості. Як встановлено в результаті експериментів, стиснення може сягати до 11% для методу стиснення Хаффмана. Метод стиснення RLE є неефективним для обробки оригінального зображення з камери. Після використанням вейвлет перетворення ефективність методів Хаффмана та RLE збільшилась до 31% та 16% відповідно. Слід враховувати що обидва алгоритми можуть мати низьку ефективність стиснення у випадках, коли вхідний файл не містить повторюваних послідовностей (для RLE) або якщо розподіл символьних вихідних даних рівномірний (для Хаффмана). У порівнянні з перетворенням JPEG, методи Хаффмана та RLE показали гірші результати але при цьому важливо підкреслити, що зазначені методі виконують стиснення без втрат, що має певні переваги при необхідності збереження роздільної здатності зображення. Методи Хаффмана та RLE дозволяють зберігати всю інформацію при зменшенні розміру файлу, що дозволяє в системах на мікроконтролерах передавати зображення з високою розбірливістю та точністю.

References

1. Bhadane, D. S., Kanawade, S. Y. (2016). Comparative study of RLE & K-RLE compression and decompression in WSN. *2016 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*. Coimbatore, India, pp. 1–5, DOI: 10.1109/ICACCS.2016.7586319.

2. Roukhami, M., Lahbib, Y., Mami A. (2016). A new efficient energy implementation of K-RLE algorithm for WSN. *2016 7th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT)*, Hammamet, Tunisia, pp. 66–70, DOI: 10.1109/SETIT.2016.7939843.

3. Mechta, D., Harous, S. (2020). HC-LEACH: Huffman Coding-based energy-efficient LEACH protocol for WSN. *2020 11th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*, New York, NY, USA, pp. 0932–0938, DOI: 10.1109/UEMCON51285.2020.9298061.

4. Sudarshan, E., Satyanarayana, C., Bindu, C. S. (2017). A Parallel RLE Entropy Coding Technique for DICOM Images on GPGPU. *2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC)*. Mysore, India, pp. 963–966, DOI: 10.1109/CTCEEC.2017.8455071.

Література

1. Bhadane D. S., Kanawade S. Y. Comparative study of RLE & K-RLE compression and decompression in WSN. *2016 3rd International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*. Coimbatore, India, 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICACCS.2016.7586319.

2. Roukhami M., Lahbib Y., Mami A. A new efficient energy implementation of K-RLE algorithm for WSN. *2016 7th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT)*. Hammamet, Tunisia, 2016. P. 66–70. DOI: 10.1109/SETIT.2016.7939843.

3. Mechta D., Harous S. HC-LEACH: Huffman Coding-based energy-efficient LEACH protocol for WSN. *2020 11th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON)*. New York, NY, USA, 2020. P. 0932–0938. DOI: 10.1109/UEMCON51285.2020.9298061.

4. Sudarshan E., Satyanarayana C., Bindu C. S. A Parallel RLE Entropy Coding Technique for DICOM Images on GPGPU. *2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication*

5. Birajdar, A., Agarwal, H., Bolia, M., Gupte, V. (2019). Image Compression using Run Length Encoding and its Optimisation. *2019 Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*. Bangalore, India, pp. 1–6, DOI: 10.1109/GCAT47503.2019.8978464.

6. Patil, R. B., Kulat, K. D. (2017). Audio compression using dynamic Huffman and RLE coding. *2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, Coimbatore, India, pp. 160–162, DOI: 10.1109/CESYS.2017.8321256.

7. Khaitu, S. R., Panday, S. P. (2018). Canonical Huffman Coding for Image Compression. *2018 IEEE 3rd International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS)*, Kathmandu, Nepal, pp. 184–190, DOI: 10.1109/CCCS.2018.8586816.

8. Pal, C., Pankaj, S., Akram, W., Acharyya, A., Biswas, D. (2018). Modified Huffman based compression methodology for Deep Neural Network Implementation on Resource Constrained Mobile Platforms. *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Florence, Italy, pp. 1–5, DOI: 10.1109/ISCAS.2018.8351234.

9. Arshad, R., Saleem, A., Khan, D. (2016). Performance comparison of Huffman Coding and Double Huffman Coding. *2016 Sixth International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH)*, Dublin, Ireland, pp. 361–364, DOI: 10.1109/INTECH.2016.7845058.

10. ESP32-CAM camera development board. Ai-Thinker Technology. URL: https://docs.ai-thinker.com/en/esp32-cam.

11. ESP32 Camera Driver. *espressif.com*. URL: https://github.com/espressif/esp32-camera/tree/master/conversions.

12. Mazin, M. Yu., Onykiienko, Yu. O. (2023). Vykorystannya veyvlet peretvoren′ dlya obrobky zobrazhen′ v systemakh Internetu rechey na mikrokontrolerakh [Wavelet Transform Application for Image Processing in Microcontroller Based Internet of Things Systems]. *Technologies and Engineering*, No. 3 (14), DOI: 10.30857/2786-5371.2023.3.2 [in Ukrainian].

13. Ren Weizheng, Wang Haobo, Xu Lianming, Cui Yansong (2011). Research on a Quasi-Lossless Compression Algorithm Based on Huffman Coding. *2011 International Conference on Transportation, Mechanical,*

(CTCEEC). Mysore, India, 2017. P. 963–966. DOI: 10.1109/CTCEEC.2017.8455071.

5. Birajdar A., Agarwal H., Bolia M., Gupte V. Image Compression using Run Length Encoding and its Optimisation. *2019 Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*. Bangalore, India, 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/GCAT47503.2019.8978464.

6. Patil R. B., Kulat K. D. Audio compression using dynamic Huffman and RLE coding. *2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. Coimbatore, India, 2017. P. 160–162. DOI: 10.1109/CESYS.2017.8321256.

7. Khaitu S. R., Panday S. P. Canonical Huffman Coding for Image Compression. *2018 IEEE 3rd International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS)*. Kathmandu, Nepal, 2018. P. 184–190. DOI: 10.1109/CCCS.2018.8586816.

8. Pal C., Pankaj S., Akram W., Acharyya A., Biswas D. Modified Huffman based compression methodology for Deep Neural Network Implementation on Resource Constrained Mobile Platforms. *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Florence, Italy, 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/ISCAS.2018.8351234.

9. Arshad R., Saleem A., Khan D. Performance comparison of Huffman Coding and Double Huffman Coding. *2016 Sixth International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH)*. Dublin, Ireland, 2016. P. 361–364. DOI: 10.1109/INTECH.2016.7845058.

10. ESP32-CAM camera development board. Ai-Thinker Technology. URL: https://docs.ai-thinker.com/en/esp32-cam.

11. ESP32 Camera Driver. *espressif.com*. URL: https://github.com/espressif/esp32-camera/tree/master/conversions.

12. Мазін М. Ю., Оникієнко Ю. О. Використання вейвлет перетворень для обробки зображень в системах Інтернету речей на мікроконтролерах. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 3 (14). DOI: 10.30857/2786-5371.2023.3.2.

13. Ren Weizheng, Wang Haobo, Xu Lianming, Cui Yansong. Research on a Quasi-Lossless Compression Algorithm Based on Huffman Coding. *2011 International Conference on*

and Electrical Engineering (TMEE), Beijing 100876, China, pp. 1729–1732, DOI: 10.1109/TMEE.2011.6199546.

Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE). Beijing 100876, China, 2011. P. 1729–1732. DOI: 10.1109/TMEE.2011.6199546.

MAZIN MAKSYM
Post graduate student,
Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-9566-6662
E-mail: maksimalnuu@ukr.net

ONYKIIENKO YURII
PhD, Associate Professor,
Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems,
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-7508-8391
Scopus Author ID: 55819618700
Researcher ID: J-6589-2017
E-mail: yurionik@gmail.com

MAZIN M. Yu., ONYKIIENKO Yu. O.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

PECULIARITIES OF USING HUFFMAN AND RLE METHODS FOR IMAGE COMPRESSION IN MICROCONTROLLER SYSTEMS

Goal: *Purpose of this paper is Study of the efficiency of using RLE and Hoffman compression methods for image compression, taking into account the limited resources of microcontrollers and, accordingly, the need to reduce image transmission time and reduce energy consumption in the wireless sensor networks.*

Method: *An experimental study of the degree of image compression was conducted using the Hoffman and RLE methods. The algorithms are implemented in software for the ESP32-CAM microcontroller module with a built-in camera. The degree of image compression performed using the Hoffman and RLE algorithms was evaluated and compared.*

Results: *A software module was created to implement the Huffman and RLE compression algorithms on the ESP32-CAM microcontroller. The effectiveness of using Huffman and RLE algorithms for image compression with limited microcontroller resources is investigated, compression efficiency and compressed file sizes are compared. As a result of the research, it was found that the RLE method showed a low compression efficiency (less than 1%) compared to the Huffman method, which provided a compression ratio of 11% for the image under test. The previous use of the Haar wavelet transform has a positive effect on the compression results for both investigated methods: for RLE, the degree of compression increased to 16%; for Huffman to 31% without loss of image quality. The JPEG method was used for efficiency comparison, which provides a degree of compression of the same image up to 70%, but with a loss of compressed data quality.*

Scientific innovation: *An analysis of the data compression efficiency using the Huffman and RLE methods, implemented taking into account the limited computing capabilities of 32-bit microcontrollers with the use of additional external memory, was performed. The influence of the choice of method on the time of image processing and the amount of memory used was studied.*

Practical significance: *Software module has been created that implements Huffman and RLE data compression algorithms. The expediency of using the above methods in systems on 32-bit microcontrollers to reduce energy consumption during image transformations and transmission, which makes it possible to extend the battery life of the sensor node, has been confirmed. At the same time, the investigated algorithms for image compression can ensure the quality of the original image with the least possible data loss.*

Keywords: *image compression; Huffman; RLE; Run-length encoding.*

https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.3

УДК 617.57-77

МАНОЙЛЕНКО О. П., КАЛІНІНА К. Р., ЛЕБЕДЕНКО Ю. О., ДІДИК М. А.
Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МЕХАТРОНИМИ СИСТЕМАМИ ТИПУ "COBOT" З ВИКОРИСТАННЯМ ML-ТЕХНОЛОГІЙ

Мета. *Роботи є дослідження та розроблення конструкції руки-маніпулятора, його мехатронної системи та програмного керування, з особливим акцентом на розгорнутій кінематиці біонічної кисті руки типу "Cobot" [1, 2]. Вдосконалення методів управління мехатронними системами та розроблення алгоритмів системи керування для створення інноваційної системи управління рукою-маніпулятором типу "Cobot", заснованої на ML-технологіях машинного зору та платформі Arduino.*

Розробка керуючих алгоритмів на мові програмування Python та їх інтеграція з Arduino, використовуючи стандартні фреймворки: "CV2", "MediaPipe", "Numpy" та "Serial" [3–6]. Кодування біомеханічних суглобів для застосування в комп'ютерному імітаційному моделюванні та дистанційному керуванні з використанням технологій штучного зору.

Методика. *Методика дослідження включала в себе використання математичних методів для аналізу кінематики біонічної кисті руки та розрахунку координат та кінематики механічної системи. Розробка програмних алгоритмів керування базувалася на мові програмування Python. Для оптимізації коду застосовані стандартні фреймворки: "CV2", "MediaPipe", "Numpy" та "Serial". Також використовувалася інтеграція програмного забезпечення з мікроконтролером Arduino для управління мехатронічною системою.*

Результати. *Розроблено інноваційну систему керування на базі руки-маніпулята типу "Cobot", яка реагує на рухи та жести кисті руки перед web-камерою. Розроблена блок-схема взаємодія електронних та електромеханічних пристроїв блоку керування кисті руки-маніпулятора "Cobot". Реалізовано керуючі алгоритми, які можуть застосовуватися в різних галузях машинобудування, включаючи медицину, промисловість та область доповненої та віртуальної реальності. Представлені алгоритми для розпізнавання жестів, розширюючи можливості використання методів машинного навчання в різних галузях. Наведені залежності кінематики пальців біонічної кисті руки типу "Cobot".*

Практична значимість. *Отримані результати вказують на потужний потенціал використання інтелектуальних систем управління мехатронними пристроями. Система може бути застосована в медицині, промисловості та області доповненої та віртуальної реальності. Робота сприяє розвитку наукових платформ і є корисною для подальших досліджень у сфері мехатроніки та інтелектуального управління.*

Ключові слова*: штучний інтелект; мехатронні системи; комп'ютерний зір; машинний зір; рука-маніпулятор; дистанційне керування; Arduino; мова програмування Python.*

Вступ. В сучасному світі технологічний прогрес надзвичайно швидко розвивається, сьогоднішній світ не можна представити без робототехнічних пристроїв, Інтернет речей (IoT-технологій) [7], AR/VR/MR-технологій [8], штучного інтелекту (AI-технологій) [9] та інших технологій Індустрії 4.0 [10]. Розвиток вказаних технологій обумовлений стрімкими науковими досягненнями в IT-галузі, впровадженням робототехнічних, мехатронних систем, а також інших систем з дистанційним керуванням з застосуванням вищезгаданих технологій.

Сучасні засоби керування робототехнічними пристроями різноманітні і включають в себе голосове керування, використання різних сенсорів і датчиків, віддалене керування через Інтернет, жести та маніпуляції, інтеграцію з віртуальною реальністю та навіть мозковий інтерфейс так звані BCI-системи [11]. Вибір конкретного методу залежить від призначення пристрою та завдань, які він повинен виконувати.

Але в сучасному світі все більш поширюється використання сучасних технологій, зокрема штучного інтелекту. Ця технологія вже стала відомою і доступною для широкого кола користувачів.

Розробка технічних засобів для контролю технологічних машин на основі машинного зору є актуальною і перспективною галуззю досліджень і практичного впровадження, оскільки вона сприяє підвищенню автоматизації та якості виробництва, зменшенню людського втручання та ризику помилок в технологічних процесах.

На сьогодні широке застосування все більше знаходять маніпулятори, що копіюють рухи людини. Ця технологія використовується в різних сферах, таких як медицина, промисловість, віртуальна реальність та інші. У медицині, наприклад, хірургічні роботи можуть виконуватися з великою точністю завдяки маніпуляторам, які повторюють рухи лікаря [12]. У віртуальній (VR) та доповненій реальностях (AR) ця технологія дозволяє користувачам взаємодіяти з віртуальними об'єктами, використовуючи свої рухи [10].

Маніпулятори, що копіюють рухи людини, також знаходять своє застосування в промисловості, де вони можуть використовуватися для автоматизації завдань, які вимагають високої точності, координації рухів та застосовуються в небезпечному для людини середовищі. Ця технологія допомагає підвищити продуктивність та знизити ризик пошкодження матеріалів, готових виробів та зберегти здоров'я, або навіть життя людині [13].

Постановка завдання. Метою цієї роботи є створення доступної системи керування, яка базується на технологіях машинного зору та платформі Arduino. Основний акцент у роботі ставиться на розробці руки-маніпулятора типу "Cobot" [1, 2] з системою керування, побудованою на технологіях машинного зору. Поєднання штучного інтелекту, зокрема комп'ютерного зору, з роботизованою рукою відкриває можливість створення інноваційного методу керування, який має численні переваги, включаючи зручність та безпечність в користуванні, ефективність та економічність. Додатковим важливим аспектом є зменшення потреби в активній взаємодії з робочою поверхнею елементів керування (пульт ДК, джойстик, консолі керування та ін.) [14].

Результат дослідження.

Механічна складова руки-маніпулятора. Рука-маніпулятор типу «Cobot» розроблена та виготовлена шляхом 3D друку на базі конструкції 3D моделі [15]. Привід біонічної кисті руки-маніпулятора містить блок приводу 1 (рис. 1а), який побудований на 5-ти міні сервоприводах типу SG90 – 2 з моментом пуску 2 кг/см. Кожне коромисло сервоприводу 2 з'єднане через пружний елемент 3 (виконаних у вигляді пружин 6х26х0,8) з верхньою тягою 4 та безпосередньо з нижньою тягою 5, які виконані з металевого дроту. Тяги 4 та 5 (рис. 2) через систему нитконапрямників $G_{i,J}^{B,H}$ з'єднані з сегментами (фалангами) I-III – біомеханічних пальців 1–5. Кожний сегмент I–III з'єднаний між собою шарнірами $P_{i,j}$ (рис. 1а, 2) (де і-тому пальцю відповідають j-ті шарнірні з'єднання конкретного елемента, відповідно, I – проксимальний (ближчий до долоні), II – середній та III – дистальний (найближчий до кінця пальця)). При цьому пружні елементи 3 та тяги 4, 5 біонічної кисті руки-маніпулятора відіграють функції «Актонів» [16] біологічної кінцівки, забезпечуючи, тим самим певне їх положення. Кожний з сервоприводів 2 (рис. 2) системою тяг 4 та 5 приводить в рух окремий палець кискисті 6 руки-маніпулятора та керується платою Arduino Nano – 7.

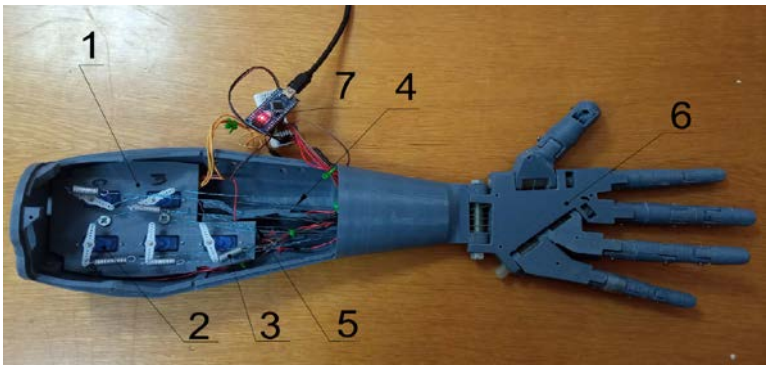
Таким чином механізм контролю пальців реалізується через натягнуті дроти тяги, які з'єднують сервоприводи 2 з кінцями сегментів (фалангів пальців) – III.

Функція положення суглобів n-го суглоба, яка враховує його положення відносно попередніх суглобів в системі координат X та Y може бути визначена виразом:

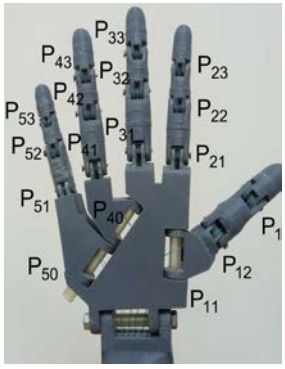
$$P(x,y) = \sum_{i=1}^{n}\left[l_i \cdot cos\left(\sum_{j=1}^{i}\theta_j\right), l_i \cdot sin\left(\sum_{j=1}^{i}\theta_j\right)\right], \quad (1)$$

де $l_{i,j}$ –довжина j-го сегменту (суглобу) певного і-го пальця;

$\theta_{i,j}$ – кут повороту-j- го сегменту (суглобу) певного і-го пальця.



а) компоновка складових частин



б) позначення шарнірів кисті руки-маніпулятор

Рис. 1. **Конструкція руки-маніпулятор типу "Cobot"**

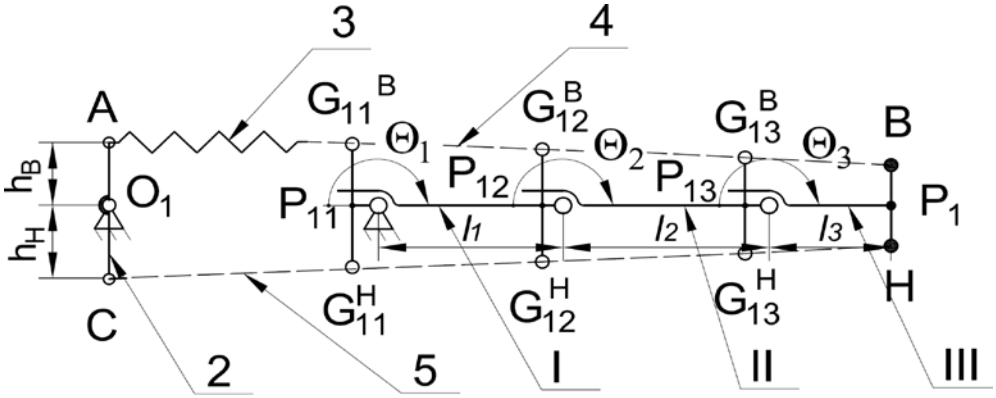


Рис. 2. **Кінематика біомеханічного «великого пальця» руки-маніпулятор типу "Cobot"**

Для кожного шарнірного з'єднання (суглоба) $P_{i,j}$ можна визначити силу згинання (розгинання) $F_{зг,I,j}$, як функцію прикладеної сили та кута повороту (згинання) $\theta_{i,j}$ в кожному $P_{i,j}$ шарнірі (суглобі).

Момент сил згинання $M_{зг,i,j}$ в кожного шарнірі (суглобі) буде дорівнювати:

$$M_{зг,i} = F_{зг,i} \cdot h_{i,j}\,. \tag{2}$$

Тоді узагальнене рівняння рівноваги моментів для всієї системи $P_{i,j}$ шарнірів (суглобів) матиме вигляд:

$$\sum_{\substack{i=1\\j=1}}^{i,j} M_{зг,i,j} = \sum_{\substack{i=1\\j=1}}^{i,j} R_{i,j} \cdot l_{i,j} \cdot cos(\alpha_{i,j}), \tag{3}$$

де $M_{зг,i,j}$ – згинаючий момент рівноваги сил j-го сегменту (відносно суглобу) певного і-го пальця;

$F_{зг,i,j}$ – приведена сила до механічної фаланги пальця;

$R_{i,j}$ – значення приведеної реакції сил в $P_{i,j}$ шарнірі (суглобі);

$\alpha_{i,j}$ – кут прикладання між вектором реакції та осьової лінії елемента.

Наведені залежності (1–3) можуть бути використані для визначення кінематичних характеристик руки-маніпулятора та раціонального вибору крутного моменту сервоприводу.

Керування та програмне забезпечення. Блок керування механічних пальців кисті руки-маніпулятора "Cobot" має вбудовану електроніку, яка побудована платформі Arduino [17] та комп'ютерне програмне забезпечення керування, що включає алгоритми штучного інтелекту на базі технологій машинного зору. Схема взаємодії електронних та електромеханічних пристроїв зображена на рис. 3.

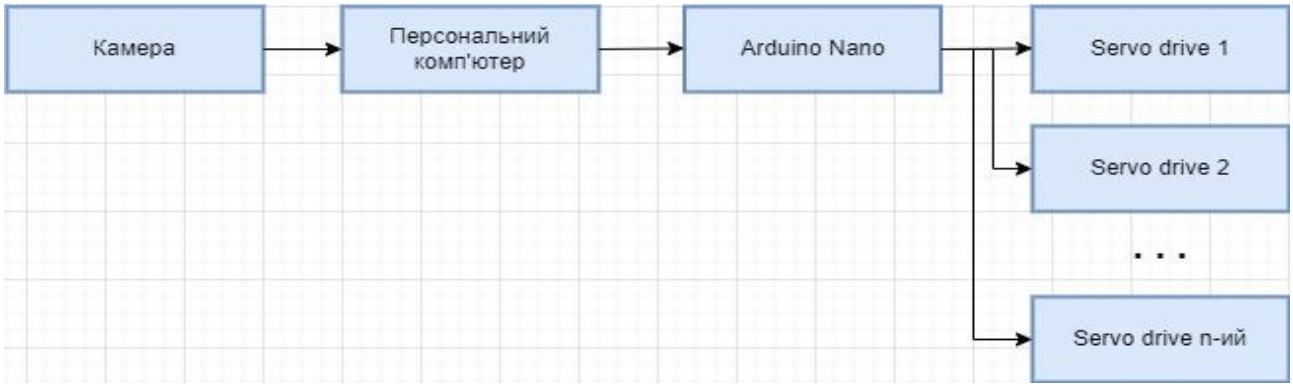


Рис. 3. **Блок-схема взаємодія електронних та електромеханічних пристроїв блоку керування кисті руки-маніпулятора "Cobot"**

Блок керування пальців кисті 1 (рис. 4) руки-маніпулятора "Cobot" 2 включає внутрішню web-камеру 3, ноутбука (далі ПК) 4 таке поєднання не потребує додаткового підключення, та забезпечує передачу сигналу через внутрішні шини інтерфейсу до операційної системи ПК. Операційна система ПК 4 пов'язана через контроллер USB 5 з контроллером зовнішньої плати керування Arduino Nano 6 та блоку 7 серводвигунів. Алгоритм керування блока 7 сервоприводів базується на сигналі, який подається від web-камери 3 та базується на коді та її IP-адресі.

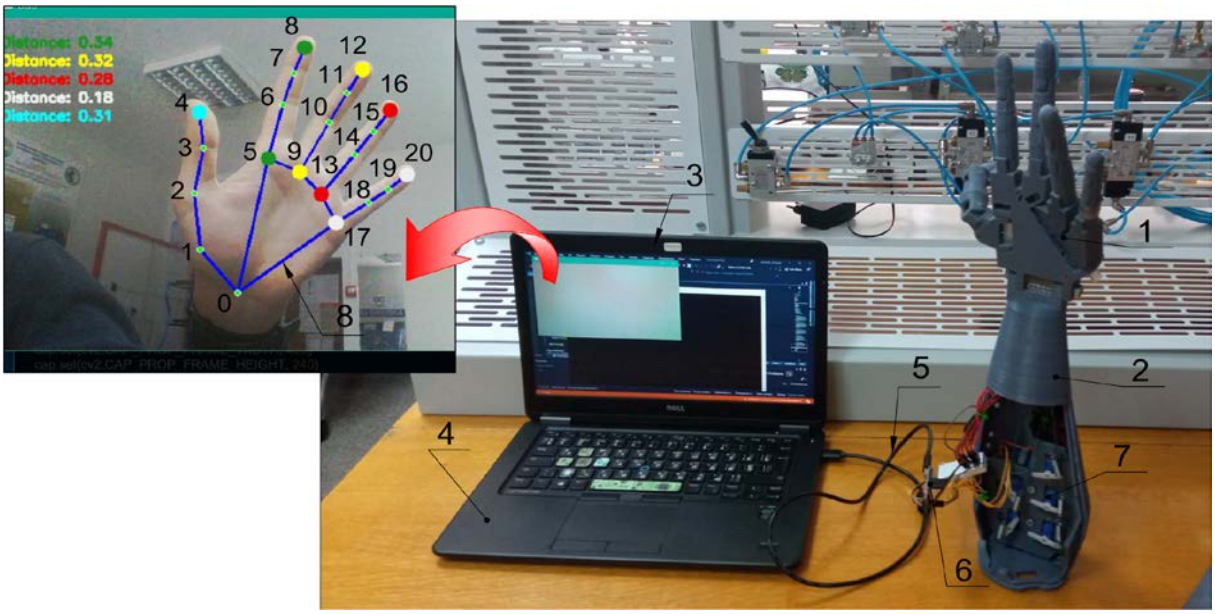


Рис. 4. **Схема підключення руки-маніпулятора та сегментація руки оператора з накладеною «маскою кисті»**

Принцип роботи блока керування базується на телеметрії поточної геометрії «маски кисті» 8 (рис. 4) за допомогою web-камери 3. Тобто оператор підносить розкриту долоню своєї руки до web-камери 3, ПК 4, таким чином, щоб зображення пальців повністю потрапило в кадр. Після цього керуюча програма автоматично накладає візуальний скелет – «маску кисті» 8 на долоню та пальці руки оператора. Певним точкам 1-20 «маски кисті» 8 (рис. 5) відповідають $P_{i,j}$ (рис. 1б) суглоби біомеханічної кисті руки-маніпулятора, т. 0 (рис. 4, 5) прийнято за початок локальної системи координат.

Після завантаження програми на мікроконтролер Arduino Nano, система може розпізнавати рухи руки оператора, такі як згинання та розгинання пальців або повторювати конкретні жести. Сформований керуючий сигнал, що базується на матриці відносних координат кожної точки від 1 до 20 (рис. 4), передається відповідній команді та через послідовний порт надсилається мікроконтролеру Arduino. Останній, у свою чергу, використовує цей керуючий сигнал для керування відповідним серводвигуном.

Наприклад, коли оператор згинає великий палець перед web-камерою, це призводить до зміни координат точок 1–4 (рис. 4) та трансформації «маски кисті» 8. У результаті цього процесу система розпізнає вказаний жест і автоматично відправляє відповідну команду на Arduino Nano. Мікроконтролер Arduino Nano шукає внутрішню програму для цієї команди і активує відповідний сервопривод, щоб виконати відповідний рух великого пальця.

Програмне забезпечення. Керуюча програма написана з використанням мови програмування, зокрема Python [18–21] та Arduino. Для програмування web-камери та взаємодії з контроллером Arduino [22], було використано програмне середовище Python.

У процесі розробки програмного забезпечення використовувалися стандартні фреймворки Visual Studio 2019 (64-біт), Arduino IDE 2.2.1 та Python 3.9. Завантаження нестандартних фреймворків здійснювалося вручну через командний рядок Windows.

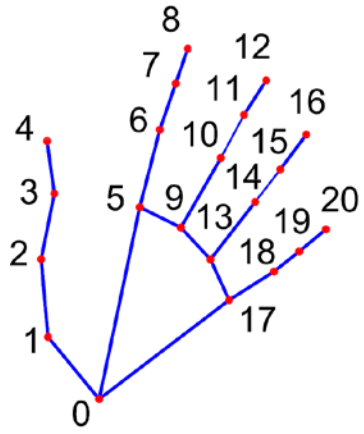
В програмному коді Python використано 4 головні фреймворки, які реалізують наступне керування (рис. 5):

1. Фреймворк "CV2" (повна назва – OpenCV) забезпечує роботу з записом та обробкою зображень/відео [1].
2. Фреймворк "MediaPipe" забезпечує роботу з комп’ютерним зором, виявлення рук/обличчя, розпізнавання жестів тощо [2].
3. Фреймворк "Numpy" забезпечує роботу з числовими даними [3].
4. Фреймворк "Serial" забезпечує роботу з передачею даних через послідовний порт (COM-порт) [4].

```
import cv2 # робота з зображення відео/зображення
import mediapipe as mp # комп'ютерний зір, виявлення руки
import numpy as np # числові дані
import serial # під'єднання к Arduino
import math #  стандарт
import time # час, таймер тощо
```

Рис. 5. **Підключені фрейворки для роботи з кодом**

Наведені фреймворки забезпечують взаємодію оператора з візуальним скелетом – «маскою руки» (рис. 6а), та забезпечують програмування для виконання конкретних операцій. Кожна точка від 0 до 20 має свою унікальну та складну назву (рис. 6б), але для зручності їх позначено простими цифрами від 0 до 20.



а)

0. WRIST
1. THMB_CMC
2. THMB_MPC
3. THMB_IP
4. THMB_TIP
5. INDEX_FINGER_MCP
6. INDEX_FINGER_PIP
7. INDEX_FINGER_DIP
8. INDEX_FINGER_TIP
9. INDEX_FINGER_MCP
10. INDEX_FINGER_PIP
11. MIDDLE_FINGER_DIP
12. MIDDLE_FINGER_TIP
13. RING_FINGER_MCP
14. RING_FINGER_PIP
15. RING_FINGER_DIP
16. RING_FINGER_TIP
17. PINKY_MCP
18. PINKY_PIP
19. PINKY_DIP
20. PINKY_TIP

б)

Рис. 6. **Інформаційна модель «маски кисті»: а – схематичне представлення скелета «маски кисті»; б – анатомічні маркери характерних точок $P_{i,j}$**

Для комп'ютерної симуляції «маски кисті» руки-маніпулятора були використані наступні точки, які були об'єднані у відрізки і пов'язані з рухомими частинами скелету (пальцями): 8=5, 12=9, 16=13, 20=17 та 4=13. Кожна з програмованих точок має визначені координати X та Y.

Для обчислення відстані між двома точками певних відрізків на площині здійснювалося за методикою [23, 24]. Шляхом зміни відстані між точками, користувач може імітувати різні жести кисті руки-маніпулятора.

Наведений код фреймворка "MediaPipe" (рис. 7) здійснює визначення та фіксацію координат конкретного базового вузла Pij пальця руки.

```
index_finger_mcp = hand_landmarks.landmark[mp_hands.HandLandmark.INDEX_FINGER_MCP]
index_finger_tip = hand_landmarks.landmark[mp_hands.HandLandmark.INDEX_FINGER_TIP]

image = cv2.circle(image, (int(index_finger_tip.x * image.shape[1]), int(index_finger_tip.y * image.shape[0])),
                   radius=8, color=(32, 117, 26), thickness=-1)
image = cv2.circle(image, (int(index_finger_mcp.x * image.shape[1]), int(index_finger_mcp.y * image.shape[0])),
                   radius=8, color=(32, 117, 26), thickness=-1)
```

Рис. 7. **Фрагмент коду для вилучення координат потрібного маркеру $P_{i,j}$ сегмента**

Стабільний зв'язок з платою Arduino Nano здійснено прописаним кодом, який наведений на рис. 8.

```
arduino_port = 'COM7'
baud_rate = 9600
ser = serial.Serial(arduino_port, baud_rate)
cap = cv2.VideoCapture(0)
```

Рис. 8. **Рядки коду підключення плати Arduino Nano**

Стабільність роботи Arduino Nano забезпечується фрагментом коду (рис. 8) за умови:

1. Відповідності порту підключення, керування рукою-маніпулятор (в нашому випадку "COM 7".

2. Встановлення швидкості передачі даних відповідно до параметрів, визначених у середовищі розробки Arduino IDE.

3. Забезпечення фізичного з'єднання комп'ютера USB та плати Arduino Nano (обов'язкова умова для роботи з кодом Python).

4. Для використання коду Arduino слід врахувати, що нахили сервоприводів не фіксуються прямо у коді. Використовується команда "Serial.parseInt()", яка зчитує відстань з коду Python і автоматично перетворює її на необхідні нахили відповідно до конкретної логіки.

Висновок. У результаті дослідження і розробки інноваційної системи керування рукою-маніпулятором "Cobot" отримано суттєві результати в області інтелектуального управління меатронними системами. Розроблений алгоритми проєктування ML-систем на базі машинного зору з застосуванням мови програмування Python та її інтеграцію з Arduino за допомогою фреймворків "CV2", "MediaPipe", "Numpy", "Serial". Розроблено реактивну систему керування, здатну взаємодіяти з рухами кисті перед web-камерою.

Наведені загальні характеристики кінематики та силових розрахунків можуть бути корисні при подальшому дослідженні подібних робототехнічних систем типу "Cobot".

Результати підтверджують потенціал застосування в галузях медицини, промисловості та VR/AR технологій.

References

1. Peshkin, M. A., Colgate, J. E., Wannasuphoprasit, W., Moore, C. A., Gillespie, R. B., Akella, P. (2001). Cobot Architecture. *IEEE transactions on robotics and automation*, P. 377–390.

2. Pavlenko, T. I., Shylo, N. Yu. (2019). Analiz kolaboratyvnykh robotiv [Analysis of collaborative robots]. *Automation and Development of Electronic Devices*, Part 2, P. 179–182 [in Ukrainian].

3. OpenCV-Python Tutorials. URL: https://docs.opencv.org/3.4/d6/d00/tutorial_py_root.html.

4. MediaPipe official documentation: Gesture recognition task guide. URL: https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/gesture_recognizer#configurations_options.

5. NumPy official documentation. URL: https://numpy.org/devdocs/user/

6. PySerial official documentation. URL: https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/

7. Pradyumna Gokhale, Omkar Bhat, Sagar Bhat (2018). Introduction to IoT. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, pp. 41–44.

8. Radu, Iu., Joy, T., Schneider, B. (2021). Virtual Makerspaces: Merging AR/VR/MR to Enable Remote Collaborations in Physical Maker Activities. *CHI EA '21: Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–5.

9. Alsheibani, S., Cheung, Y., Messom, C. (2018). Artificial Intelligence Adoption: AI-readiness at Firm-Level. *Twenty-Second Pacific Asia Conference on Information Systems*, pp. 1–12.

Література

1. Peshkin M. A., Colgate J. E., Wannasuphoprasit W., Moore C. A., Gillespie R. B., Akella P. Cobot Architecture. *IEEE transactions on robotics and automation.* 2001. P. 377–390.

2. Павленко Т. І., Шило Н. Ю. Аналіз колаборативних роботів. *Automation and Development of Electronic Devices*. 2019. Ч. 2. С. 179–182.

3. OpenCV-Python Tutorials. URL: https://docs.opencv.org/3.4/d6/d00/tutorial_py_root.html

4. MediaPipe офіційний довідник: Gesture recognition task guide. URL: https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/gesture_recognizer#configurations_options.

5. NumPy official documentation. URL: https://numpy.org/devdocs/user/

6. PySerial official documentation. URL: https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/

7. Pradyumna Gokhale, Omkar Bhat, Sagar Bhat. Introduction to IOT. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2018. P. 41–44.

8. Radu Iu., Joy T., Schneider B. Virtual Makerspaces: Merging AR/VR/MR to Enable Remote Collaborations in Physical Maker Activities. *CHI EA '21: Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2021. P. 1–5.

9. Alsheibani S., Cheung Y., Messom C. Artificial Intelligence Adoption: AI-readiness at Firm-Level. *Twenty-Second Pacific Asia*

Conference on Information Systems. 2018. P. 1–12.

10. Lasi, H., Kemper, H.-G., Fettke, P., Feld, T., Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, pp. 239–242.

10. Lasi H., Kemper H.-G., Fettke P., Feld T., Hoffmann M. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*. 2014. P. 239–242.

11. Martini, M. L., Oermann, E. K., Opie, N. L., Panov, F., Oxley, T., Yaeger, K. (2020). Sensor Modalities for Brain-Computer Interface Technology: A Comprehensive Literature Review. *Neurosurgery*, 86 (2), E108, DOI: 10.1093/neuros/nyz286.

11. Martini M. L., Oermann E. K., Opie N. L., Panov F., Oxley T., Yaeger K. Sensor Modalities for Brain-Computer Interface Technology: A Comprehensive Literature Review. *Neurosurgery*. 2020. No. 86 (2). E108. DOI: 10.1093/neuros/nyz286.

12. Dvorakevych, A. O., Huraievskyi, A. A., Stasyshyn, A. R., Huraievskyi, D. A., Shevchuk, D. V., Kalinchuk, O. O. (2022). Pershyi dosvid zastosuvannia robot-asystovanoi khirurhii v dytiachomu vitsi v Ukraini [First experience of robot-assisted surgery in childhood in Ukraine]. *PEDIATRIC SURGERY. UKRAINE*, pp. 91–95 [in Ukrainian].

12. Дворакевич А. О., Гураєвський А. А., Стасишин А. Р., Гураєвський Д. А., Шевчук Д. В., Калінчук О. О. Перший досвід застосування робот-асистованої хірургії в дитячому віці в Україні. *PAEDIATRIC SURGERY. UKRAINE*. 2022. С. 91–95.

13. Krainiuk, O. V., Buts, Yu. V., Barbashyn, V. V., Severynov, O. V. (2022). Vykorystannia tekhnolohii virtualnoi ta dopovnenoi realnosti dlia zabezpechennia bezpeky pratsi [The use of virtual and augmented reality technologies to ensure occupational safety]. *Komunalne hospodarstvo mist = Communal management of cities*, pp. 165–172 [in Ukrainian].

13. Крайнюк О. В., Буц Ю. В., Барбашин В. В., Северинов О. В. Використання технологій віртуальної та доповненої реальності для забезпечення безпеки праці. *Комунальне господарство міст*. 2022. С. 165–172.

14. Kalinina, K. R., Skidan, V. V., Lebedenko, Yu. O. (2023). Prohramno-aparatna platforma dlia keruvannia mekhatronnymy systemamy za dopomohoiu zhestiv [Software and hardware platform for controlling mechatronic systems using gestures]. *Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Nauka, osvita, tekhnolohii i suspilstvo v umovakh hlobalizatsii" = Materials of the International Scientific and Practical Conference "Science, Education, Technology and Society in the Conditions of Globalization"* (10.06.2023, Bila Tserkva), pp. 19–20 [in Ukrainian].

14. Калініна К. Р., Скідан В. В., Лебеденко Ю. О. Програмно-апаратна платформа для керування мехатронними системами за допомогою жестів. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "Наука, освіта, технології і суспільство в умовах глобалізації"* (10.06.2023, Біла Церква). С. 19–20.

15. Website InMoov. URL: https://inmoov.fr/inmoov-stl-parts-viewer/?bodyparts=Right-Hand.

15. Website InMoov. URL: https://inmoov.fr/inmoov-stl-parts-viewer/?bodyparts=Right-Hand.

16. Morccki, A., Ekicl, J., Fidclus, K. (1971). Bionics of movement. Warsaw.

16. Morccki A., Ekicl J., Fidclus K. Bionika ruchu. Warszawa, 1971.

17. Website Arduino.cc official documentation. URL: https://docs.arduino.cc/learn/

17. Website Arduino.cc Arduino.cc official documentation. URL: https://docs.arduino.cc/learn/

18. John Wiley & Sons, Inc. (2018). Beginning Programming with Python For Dummies. 2nd Edition. 379 p.

18. Beginning Programming with Python For Dummies. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2018. 379 p.

19. Packt Publishing (2018). Clean Code in Python Refactor your legacy code base. 311 p.

19. Clean Code in Python Refactor your legacy code base. Packt Publishing, 2018. 311 p.

20. Website Python official documentation. URL: https://www.python.org/

20. Website Python official documentation. URL: https://www.python.org/

21. Putivnyk movoiu prohramuvannia Python [Guide to the Python programming language]. URL: https://pythonguide.rozh2sch.org.ua/

22. Website Real Python: Arduino With Python: How to Get Started. URL: https://realpython.com/arduino-python/

23. Lykhosherstov, D. O., Lebedev, D. Yu. (2022). Porivnialnyi analiz shliakhiv vyznachennia zobrazhennia na videoriadi zasobamy mashynnoho navchannia [Comparative analysis of methods for determining an image on a video sequence using machine learnin]. *Zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho = Notes of TNU named after V. I. Vernadskyi*, pp. 20–26. URL: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2022/5_2022/3.pdf.

24. Website OnlineMSchool. URL: https://ua.onlinemschool.com/math/library/analytic_geometry/point_point_length/

21. Путівник мовою програмування Python. URL: https://pythonguide.rozh2sch.org.ua/

22. Website Real Python: Arduino With Python: How to Get Started. URL: https://realpython.com/arduino-python/

23. Лихошерстов Д. О., Лебедев Д. Ю. Порівняльний аналіз шляхів визначення зображення на відеоряді засобами машинного навчання. *Записки ТНУ імені В. І. Вернадського*. 2022. С. 20–26. URL: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2022/5_2022/3.pdf

24. Website OnlineMSchool. URL: https://ua.onlinemschool.com/math/library/analytic_geometry/point_point_length/

MANOILENKO OLEKSANDR
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Mechanical Engineering, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-5670-4977
Scopus Author ID: 57194469280
E-mail: manojlenko.op@knutd.edu.ua

KALININA KRISTINA
Student of Department of Information and Computer Technologies, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0009-0006-8713-2584
E-mail: kalinina.kr@knutd.edu.ua

LEBEDENKO YURII
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information and Computer Technologies, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-1352-9240
Scopus Author ID: 57193066468
E-mail: lebedenko.yo@knutd.edu.ua

DIDYK MYHAILO
Student of Department of Mechanical Engineering, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0009-0001-9692-902X
E-mail: didykmyhajlo@gmail.com

MANOILENKO O. P., KALININA K. R., LEBEDENKO Yu. O., DIDYK M. A.
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS OF COBOT-TYPE MECHATRONIC SYSTEMS USING ML TECHNOLOGIES

Goal. *The works are research and development of the design of the manipulator hand, its mechatronic system and software control, with a special emphasis on the developed kinematics of the "Cobot" type bionic hand brush [1, 2]. Improvement of mechatronic systems control methods and development of control system algorithms for the creation of an innovative "Cobot" manipulator arm control system based on ML machine vision technologies and the Arduino platform.*

Development of control algorithms in the Python programming language and their integration with Arduino using standard frameworks: "CV2", "MediaRipe", "Numpy" and "Serial" [3–6]. Coding of biomechanical joints for use in computer simulation modeling and remote control using artificial vision technologies.

Method. *The research methodology included the use of mathematical methods to analyze the kinematics of the bionic hand and calculate the coordinates and kinematics of the mechanical system. The*

development of software control algorithms was based on the Python programming language. Standard frameworks: "CV2", "MediaRipe", "Numpy" and "Serial" are used to optimize the code. Software integration with an Arduino microcontroller was also used to control the mechatronic system.

The results. *An innovative control system has been developed based on a "Cobot" hand manipulator, which responds to hand movements and gestures in front of the web camera. A block diagram of the interaction of electronic and electromechanical devices of the hand control unit of the "Cobot" hand manipulator was developed. Control algorithms have been implemented that can be applied in various fields of mechanical engineering, including medicine, industry, and the field of augmented and virtual reality. Algorithms for gesture recognition are presented, expanding the possibilities of using machine learning methods in various fields. The dependences of the kinematics of the fingers of the "Cobot" type bionic brush hand are given.*

Practical significance. *The obtained results indicate the powerful potential of using intelligent control systems of mechatronic devices. The system can be applied in medicine, industry and the field of augmented and virtual reality. The work contributes to the development of scientific platforms and is useful for further research in the field of mechatronics and intelligent control.*

Keywords: *artificial intelligence; mechatronic systems; computer vision; machine vision; robotic arm; remote control; Arduino; Python programming language.*

https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.4

УДК 621.924.7

[1]ПАВЛЕНКО В. М., [2]КУРЛЯК П. О., [1]ВОЛЯНИК О. Ю.
[1] Київський національний університет технологій та дизайну, Україна
[2] Івано-Франківський національний університет нафти і газу, Україна

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕХАНІЗМАМИ ЗІ ЗМІННИМ ДИСБАЛАНСОМ

Мета. *Проведення аналітичного та експериментального дослідження, розробка системи керування механізмами зі змінним дисбалансом. Дослідження режимів роботи, перевірка алгоритму роботи та визначення стійких станів незбалансованої мехатронної системи. Визначення залежностей, які описують характер впливу навантаження на робочі органи.*

Методика. *Використані методи математичного моделювання мехатронних систем методом побудови Bond Graph, алгоритмічного проєктування, експериментального дослідження зі збором даних.*

Результати. *Проведено аналітичний огляд природи утворення та методів боротьби з дисбалансом у нестабільних мехатронних системах, розроблено та запропоновано систему автоматичного керування балансуванням роторів за допомогою цифрових моніторів у центрифугах зі змінним дисбалансом. Система керування включає мікроконтролер, датчик Холла, BondGraph модель для моделювання роботи асинхронного двигуна. Розроблено алгоритм для керуючої програми, яка, відповідно до встановлених параметрів, перевіряє номінальне та критичне значення струму у приводі центрифуги. При цьому, значення струму фіксується і ведеться моніторинг коливань. У разі збільшення струму система знижує оберти на 10% для зменшення амплітуди коливань в перехідних режимах її обертання, продовжуючи при цьому контролювати допустиму межу струму і навантаження на двигун.*

Наукова новизна. *Проведено аналіз аспектів виникнення та дослідження регулювання незбалансованих систем. Запропоновано структурну схему системи керування роторними механізмами із застосуванням засобів цифрового моніторингу. Розроблено алгоритм керування системою. Проведено дослідження нестабільних станів із застосуванням методів комп'ютерного моделювання BondGraph.*

Практична значимість. *У результаті проведеного аналітичного дослідження було розглянуто явище дисбалансу в мехатронних системах. Спроєктовано та реалізовано експериментальну модель для керування дисбалансом у роторних відцентрових механізмах. Отримані результати та висновки можуть бути використані при проєктуванні відцентрових машин у різних галузях промисловості.*

Ключові слова: *система керування дисбалансом; вібрації; BondGraph; балансування.*

Вступ. Розглядаючи проблему балансування систем, варто зазначити, що розвиток сучасних методів керування надає широкі можливості для дослідження нестійких станів і пов'язаних з ними проблем [1]. Рівень дисбалансу ротора, який є допустимим на низькій швидкості, може бути неприпустимим на більш високій швидкості, оскільки відцентрова сила, викликана дисбалансом, може бути поєднана з пружною деформацією ротора. Дисбаланс у системі, що обертається, може мати руйнівні наслідки під час запуску, уповільнення або під час роботи на критичній частоті, або на такій, що наближена до неї [2].

В процесі розгону або гальмування з'являються коливання з великими амплітудами при проходженні через резонанс [3]. Їх спричиняє розбалансування центрифуг, в результаті чого руйнуються конструктивні елементи роторів.

У всіх конструкціях діють сили, що виникають внаслідок звичайних робочих процесів, і такі сили, як правило, також залежать від підходів до керування. Тому розробка нових або модернізація існуючих систем керування з покращеними характеристиками та параметрами є

основою до розрахунків для працездатності та довговічності елементів конструкцій побутових та промислових центрифуг [4].

Постановка завдання. З метою подовження терміну служби опорних підшипників у центрифугах необхідно розробити власну систему керування приводом такої відцентрової машини, яка б унеможливлювала її перехід в режим дисбалансу. Одним з перспективних шляхів удосконалення процесу є регулювання кількості обертів після досягнення першої критичної швидкості обертання, при якій відбувається розбалансування. Сигнал можна отримати за допомогою датчика струму, підключеного до джерела живлення, що дає можливість зменшити вібрації на валу з мінімальними змінами в конструкції центрифуг.

В результаті руху деталей зі змінною швидкістю на них діють інерційні сили, які викликають появу додаткових динамічних навантажень на елементи з'єднання і підшипникові опори. Ці навантаження є джерелом інших механічних напружень, які викликають підвищене зношування окремих деталей і складальних одиниць, коливання і вібрації. Припустимо, що амплітуда цих коливань досить велика, що відбувається в області частот, близьких до резонансу. Тоді виникаючі напруження можуть зруйнувати підшипникові опори і підвіски центрифуг [5].

Результати дослідження. Для вирішення поставленої задачі було розроблено комп'ютерно-інтегровану систему для керування врівноваженням роторів центрифуг зі змінним дисбалансом. На рис. 1 показано структурну схему розробленої системи, яка побудована на базі приводу вертикальної центрифуги.

Досліджувана система складається з двигуна Д, центрифуги Ц, датчика струму ДС, датчика Холла ДХ, мікроконтролера МК, блоку комунікації БК, силового блоку СБ, блоку живлення БЖ.

Датчик струму і датчик Холла встановлені на приводі двигуна, який посилає сигнали на мікроконтролер, в який завантажена програма управління.

Блок живлення був обраний з урахуванням запасу по струму і має такі характеристики: напруга – 12 В, струм – 5 А. Оскільки він працює в імпульсному режимі, то під час роботи може давати на виході сигнал з шумами, тому довелося додатково встановити конденсатори-фільтри 4700 мкФ х 25 В і 220 нФ х 25 В.

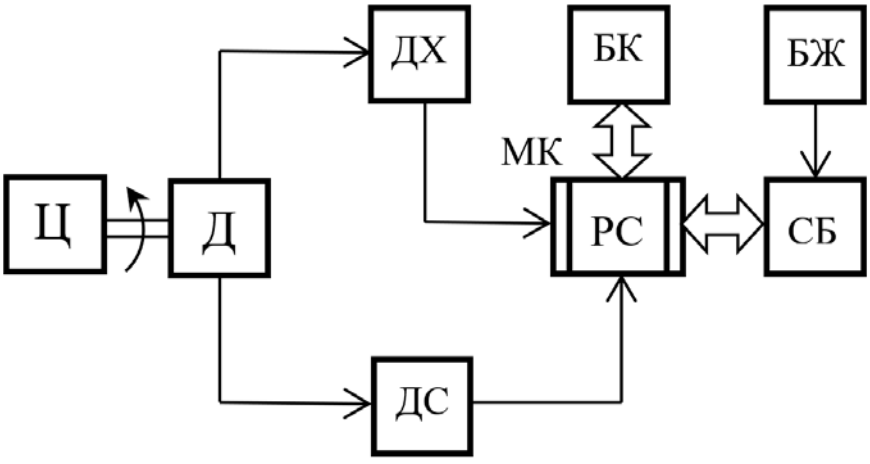


Рис. 1. **Структурна схема системи керування балансуванням роторів**

Мікроконтролер (ATmega328) з периферійними пристроями та датчиками і підключені через окремий лінійний стабілізатор, вихідна напруга становить 5 В, а струм – 0,8 А. Двигун і блок живлення підключені до основної лінії живлення. Комунікаційний блок має окремий роз'єм USB type B для передачі даних на ПК.

Після подачі живлення система починає працювати відповідно до заданого алгоритму роботи, показаного на рис. 2.

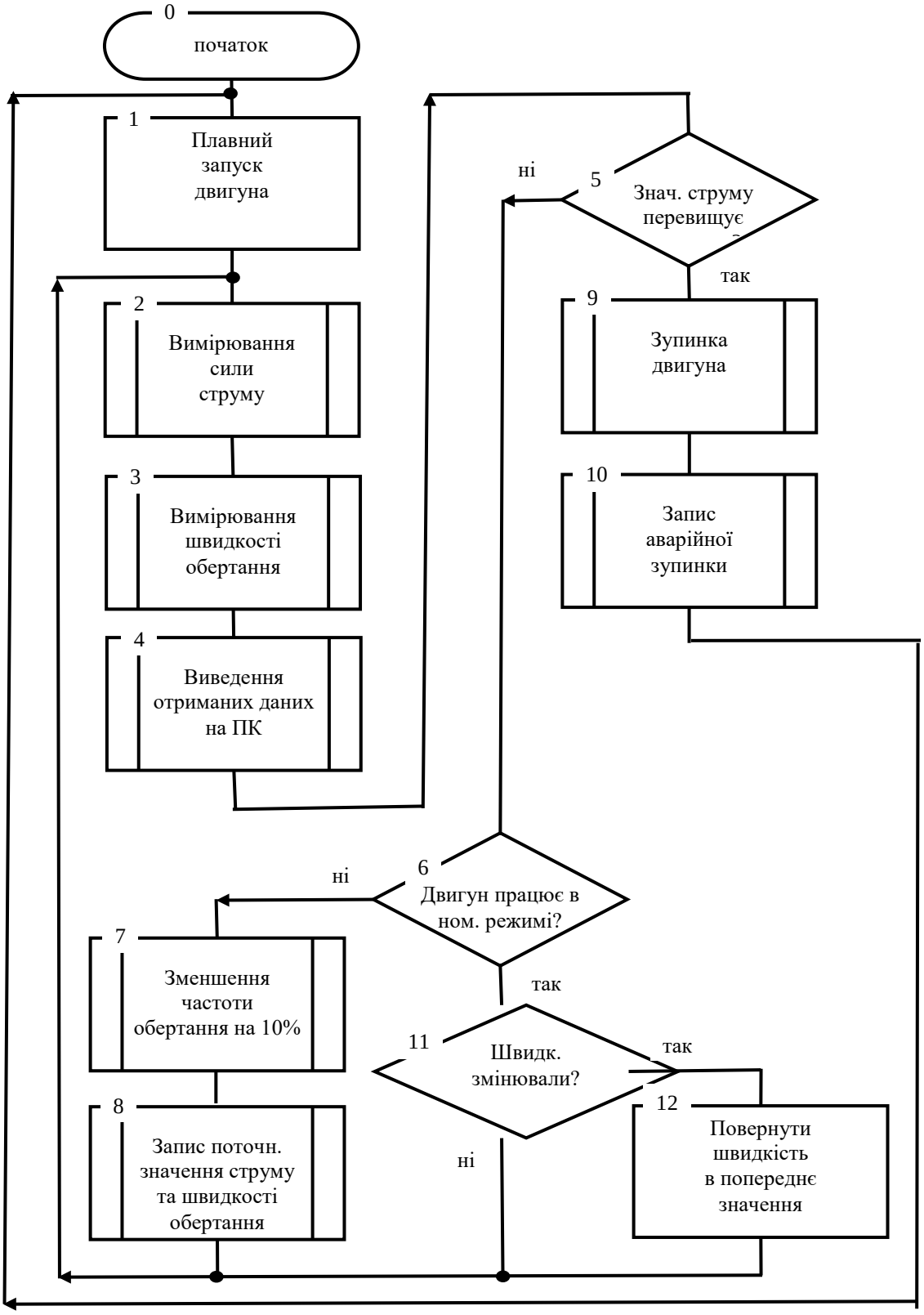


Рис. 2. **Спрощена блок-схема системи керування**

Електрообладнання складається з колекторного двигуна постійного струму МА-40, датчика струму, датчика Холла, мікроконтролера ATmega328, вольтметра, амперметра, лінійного стабілізатора напруги, польового транзистора IRF44N, динаміка та елементів кріплення.

Система активується шляхом підключення зовнішнього джерела живлення з напругою 12 В. Потім, завдяки стабілізатору, напруга знижується до 5 В і живить мікроконтролер та периферійні пристрої. Динамік необхідний для сигналізації наявності процесу перевантаження, а також виходу з нього. Вольтметр і амперметр встановлені для перевірки точності показань датчиків під час експлуатації та експериментального дослідження системи. Мікроконтролер працює на частоті 16 МГц від зовнішнього кварцового резонатора. Датчик Холла підключений до порту PD2 мікроконтролера. Датчик струму видає аналоговий сигнал, і він підключений до аналогового порту МК. Далі система обробляє цифрові дані, отримані через АЦП. Польовий транзистор IRF44N керує двигуном за допомогою ШІМ.

При запуску двигуна привід центрифуги має повільний запуск з попередньою перевіркою струму на заклинювання центрифуги. Потім дані, зібрані з датчиків, використовуються контролером для аналізу процесу і передаються на ПК. Далі відбувається перевірка номінального і критичного значення струму, а також запис їх поточних значень і контроль змін, що відбулися.

При виникненні зовнішнього навантаження струм приводу центрифуги починає збільшуватися, система автоматично скидає оберти на 10% для зменшення дисбалансу центрифуги. Якщо струм продовжує зростати після декількох послідовних скидань, перевіряється критичне значення струму, і якщо воно перевищено, двигун зупиняється. Коли значення струму знижується до допустимої межі, двигун починає повільний запуск і переходить в робочий режим.

Для моделювання режимів роботи двигуна центрифуги використано комп'ютерну Bond Graph модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором [6], [7].

Структура Bond Graph моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором містить трифазну обмотку статора, яка живиться від симетричного джерела синусоїдальної напруги u_a,u_b,u_c.

$$\begin{aligned} u_a &= U_m \sin(\omega t); \\ u_b &= U_m \sin(\omega t - \tfrac{2\pi}{3}); \\ u_c &= U_m \sin(\omega t + \tfrac{2\pi}{3}). \end{aligned} \quad (1)$$

З метою зменшення кількості диференціальних рівнянь модель розроблено у двофазній системі координат αβ. Координатний перехід від трифазної системи a,b,c до двофазної системи αβ здійснюється за допомогою трансформаторних елементів TF1-TF5, двох 0- і двох 1-з'єднань (рис. 3) і виражається наступним чином:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos\frac{2\pi}{3} & \cos\frac{4\pi}{3} \\ \sin 0 & \sin\frac{2\pi}{3} & \sin\frac{4\pi}{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Процеси електромеханічного перетворення енергії в Bond Graph моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором описуються системою диференціальних рівнянь балансу напруг за другим законом Кірхгофа (3), рівнянням електромагнітного моменту двигуна за законом Ленца (4), та рівнянням руху електропривода (5)

$$\begin{cases} u_\alpha^s = R_\alpha^s i_\alpha^s + L_\alpha^s \dfrac{di_\alpha^s}{dt} + M\dfrac{di_\alpha^r}{dt}, \\ u_\beta^s = R_\beta^s i_\beta^s + L_\beta^s \dfrac{di_\beta^s}{dt} + M\dfrac{di_\beta^r}{dt}, \\ 0 = R_\alpha^r i_\alpha^r + L_\alpha^r \dfrac{di_\alpha^r}{dt} + M\dfrac{di_\alpha^s}{dt} + \omega^r(L_\beta^r i_\beta^r + M i_\beta^s), \\ 0 = R_\beta^r i_\beta^r + L_\beta^r \dfrac{di_\beta^r}{dt} + M\dfrac{di_\beta^s}{dt} - \omega^r(L_\alpha^r i_\alpha^r + M i_\alpha^s); \end{cases} \tag{3}$$

$$T_e = p\left[i_\alpha^r\left(Mi_\beta^s + L^r i_\beta^r\right) - i_\beta^r(Mi_\alpha^s + L^r i_\alpha^r)\right] \tag{4}$$

$$T_e = J\frac{d\omega^r}{dt} + c\omega^r + T_L \tag{5}$$

де u_α^s, u_β^s – α,β складові напруги обмоток статора; $i_\alpha^s, i_\beta^s, i_\alpha^r, i_\beta^r$ – α,β складові струму в обмотках статора і ротора; $R_\alpha^s, R_\beta^s, R_\alpha^r, R_\beta^r$ – активні опори обмоток статора і ротора; $L_\alpha^s, L_\beta^s, L_\alpha^r, L_\beta^r$ – повні індуктивності обмоток статора і ротора; ω^r – кутова швидкість обертання ротора; T_e – електромагнітний момент двигуна; p – кількість пар полюсів; J – момент інерції ротора двигуна; M – взаємна індуктивність; с – коефіцієнт тертя валу в підшипниках; T_L – момент навантаження на валу.

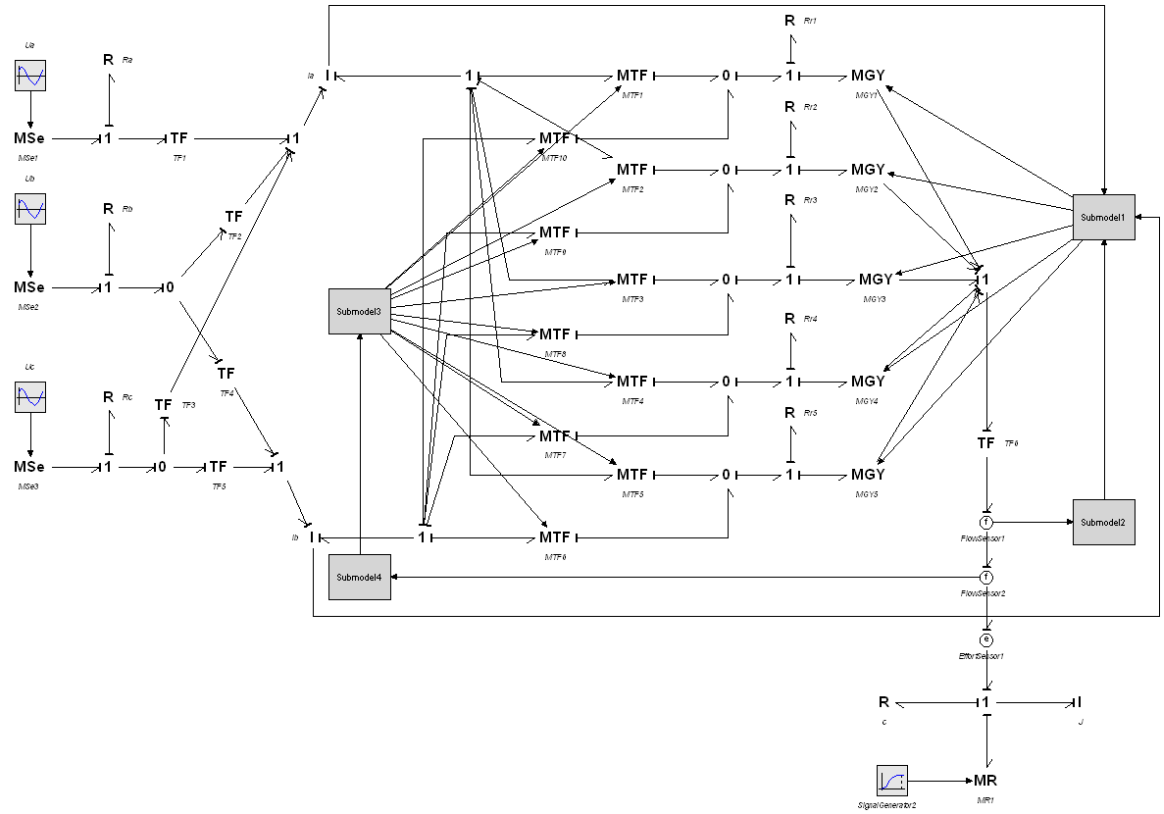


Рис. 3. **Модель Bond Graph асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором**

Електромагнітна взаємодія між статором і ротором здійснюється за допомогою потокозчеплення ψ, яке в моделі Bond Graph асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором виражається через індуктивності I_a, I_b:

$$\begin{cases} \psi_\alpha^s = L_\alpha^s i_\alpha^s + M i_\alpha^r, \\ \psi_\beta^s = L_\beta^s i_\beta^s + M i_\beta^r, \\ \psi_\alpha^r = M i_\alpha^s + L_\alpha^r i_\alpha^r, \\ \psi_\beta^r = M i_\beta^s + L_\beta^r i_\beta^r, \end{cases} \quad (6)$$

де $\psi_\alpha^s, \psi_\beta^s, \psi_\alpha^r, \psi_\beta^r - \alpha, \beta$ складові потокозчеплення обмоток статора і ротора.

Кількість стрижнів короткозамкненого ротора залежить головним чином від потужності та габаритів двигуна. Для двигуна центрифуги в моделі Bond Graph ми розглядаємо короткозамкнений ротор, що містить п'ять стрижнів з активними опорами R1-R5. Кожен стрижень з'єднаний на кінцях поворотними кільцями. Струми, індуковані обертовим магнітним полем, проходять через кожен стрижень і замикаються на кільцях. Таким чином, п'ять струмів ротора протікають у п'яти стрижнях, що відображено на графіку зв'язків моделі. Враховуючи, що під час роботи двигуна ротор обертається, струми в кожному стрижні залежать від його кутового положення θ відносно статора. Залежність струмів у стрижнях ротора від складових струмів α,β:

$$i_k^r = m \begin{bmatrix} i_\alpha^r \cos\left(\theta + \dfrac{2(k-1)\pi}{n}\right) + \\ + i_\beta^r \sin\left(\theta + \dfrac{2(k-1)\pi}{n}\right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

де $m = \sqrt{\frac{2}{n}}$; n – кількість стержнів ротора; $k = 1,2,\dots n$.

На Bond Graph моделі асинхронного двигуна співвідношення (7) представлено двома 1- з'єднаннями (i_α^r, i_β^r), а трансформатори MTF1-MTF10 з модульованими коефіцієнтами трансформації, розрахованими в Submodel3, відповідають виразам:

$$\begin{aligned} t_k &= m \cos\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) \\ t_{k+n} &= m \sin\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

та 0- з'єднаннями, на яких узагальнюються струми ротора вздовж осей α,β:

$$\begin{aligned} \psi_\alpha^r + t_1\psi_1 + t_2\psi_2 + t_3\psi_3 + t_4\psi_4 + t_5\psi_5 = 0 \\ \psi_\beta^r + t_6\psi_6 + t_7\psi_7 + t_8\psi_8 + t_9\psi_9 + t_{10}\psi_{10} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Рівняння струмів ротора в матричній формі:

$$\begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \\ i_{r4} \\ i_{r5} \end{bmatrix} = m \times \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \cos\left(\theta + \dfrac{2\pi}{5}\right) & \sin\left(\theta + \dfrac{2\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta + \dfrac{4\pi}{5}\right) & \sin\left(\theta + \dfrac{4\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta + \dfrac{6\pi}{5}\right) & \sin\left(\theta + \dfrac{6\pi}{5}\right) \\ \cos\left(\theta + \dfrac{8\pi}{5}\right) & \sin\left(\theta + \dfrac{8\pi}{5}\right) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha^r \\ i_\beta^r \end{bmatrix} \quad (10)$$

Обертовий електромагнітний момент двигуна з урахуванням струмів ротора дорівнює:

$$T_e = \sum_{k=1}^{n} T_k = \frac{p}{2} \sum_{k=1}^{n} m \cdot \begin{bmatrix} \psi_\beta^r \cos\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) - \\ -\psi_\alpha^r \sin\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) \end{bmatrix} \quad (11)$$

У моделі Bond Graph співвідношення (11) представлено MGY1-MGY5 з модульованими коефіцієнтами (Submodel1), які відповідають виразу:

$$r_k = m \cdot \begin{bmatrix} \psi_\beta^r \cos\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) - \\ -\psi_\alpha^r \sin\left(\theta + \frac{2(k-1)\pi}{n}\right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Навантажувальний момент на валу T_L на Bond Graph (рис. 3) формується активним опором R_навант, який відображає передачу механічної енергії від двигуна до приводного механізму. Значення цього опору для номінального навантаження з короткозамкненим ротором визначається зі співвідношення:

$$R\text{_навант} = \frac{P_n}{(\omega_n^r)^2} \quad (13)$$

де P_n, ω_n^r – потужність і кутова швидкість обертання валу при номінальному навантаженні двигуна.

За допомогою цієї моделі та програми 20-sim 4.0 Professional було проведено дослідження пускових режимів роботи при номінальному навантаженні центрифуги. На рис. 4–5 наведено результати моделювання. Зокрема, на рис. 4 – залежності фазного струму статора $i_a^s = f(t)$ та індукованого струму в обмотці ротора $i_1^r = f(t)$. Отримані криві фазних струмів статора і ротора підпорядковані відомому співвідношенню частот цих струмів від ковзання – $f_2 = f_1 s$. На рис. 5 – залежності зміни моменту $T_e = f(t)$ і кутової швидкості $\omega = f(t)$ під час пуску двигуна за номінального навантаження на валу.

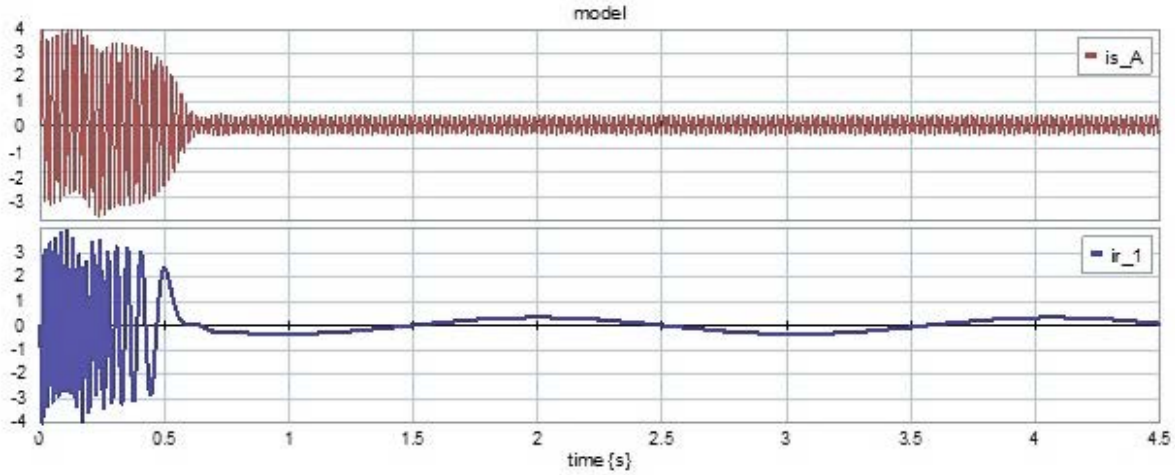


Рис. 4. **Залежності зміни фазного струму статора i_a^s та індукованого струму в обмотці ротора i_1^r під час пуску двигуна**

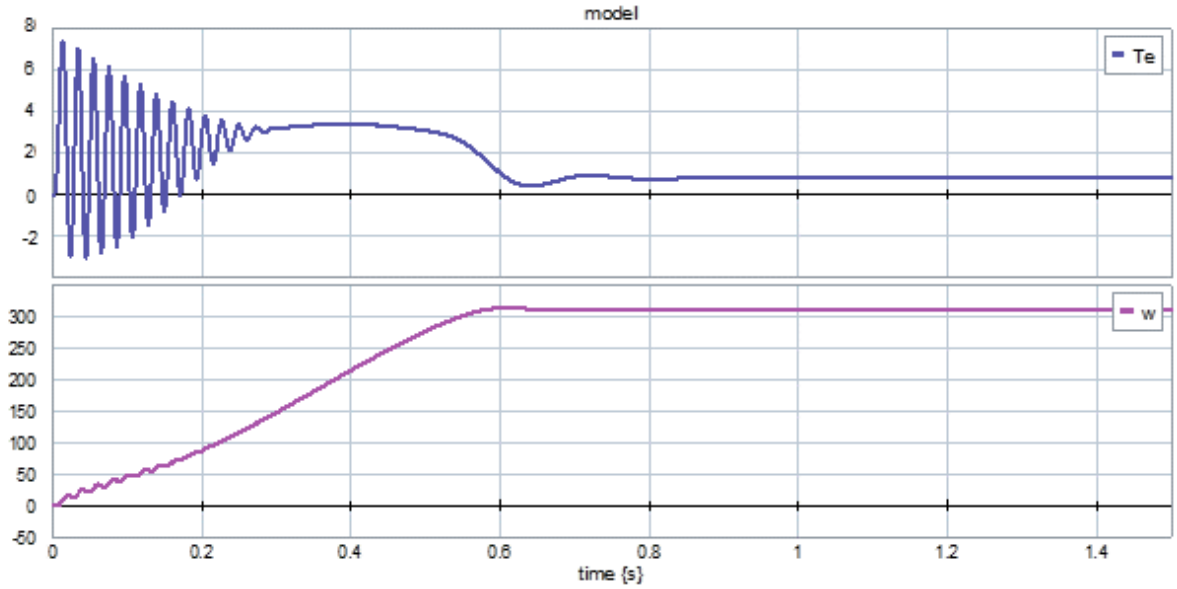


Рис. 5. **Залежності крутного моменту T_e та кутової швидкості ω під час запуску двигуна**

Для дослідження роботи системи керування приводом центрифуги було проведено декілька експериментів: без навантаження, з навантаженням та в режимі дисбалансу.

На рис. 6 зображено лабораторний стенд, на якому реалізовано розроблену систему керування зрівноваженням роторів центрифуг зі змінним дисбалансом.

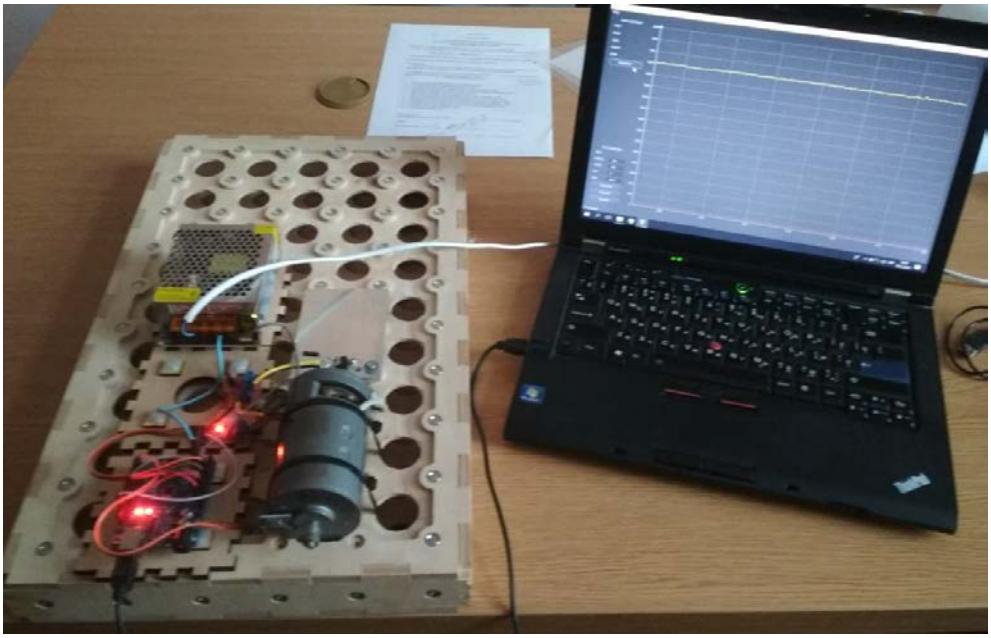


Рис. 6. **Лабораторний стенд для дослідження приводу центрифуги**

Значення струму при запуску – 2 А, а при виході на номінальний режим роботи – 0,9 А. Кількість обертів на номінальному режимі – 2800 об/хв.

На рис. 7 наведено результати дослідження роботи системи під впливом зовнішнього навантаження під час роботи. Після того, як привод вийшов на номінальний режим роботи (про що свідчить струм і швидкість його обертання), на вал почало діяти навантаження. У зв'язку з цим струм також почав зростати.

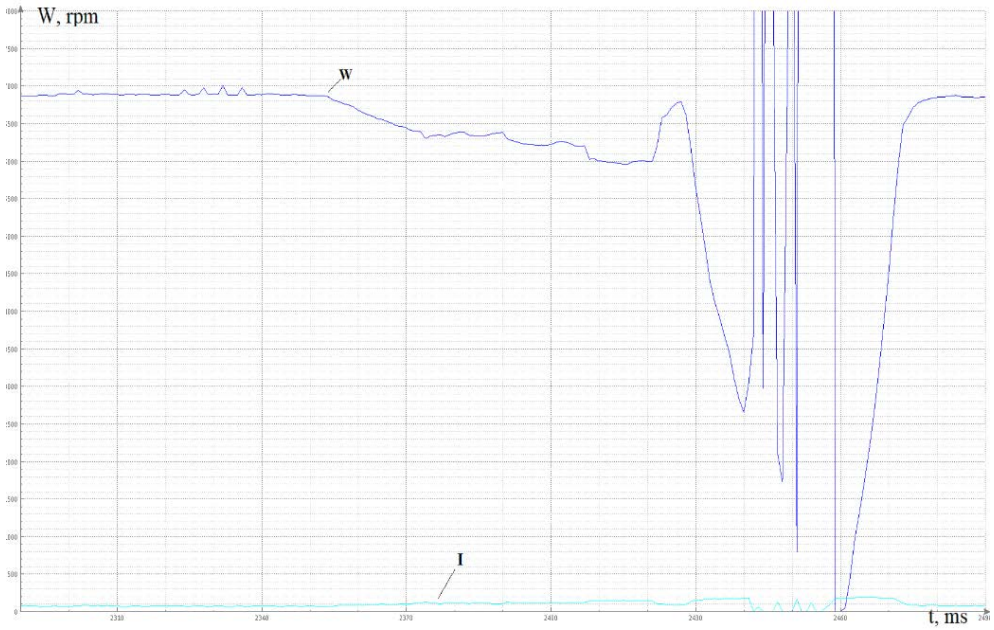


Рис. 7. **Графік запуску приводу в режимі навантаження**

В результаті система почала знижувати оберти, щоб поступово вийти на номінальний режим роботи. Однак навантаження продовжувало зростати, і відбулося гальмування двигуна. Потім відбувся повільний пуск приводу, і він вийшов на номінальний режим роботи. Оберти зросли до 2800 об/хв, струм – до 0,9 А.

Результати досліджень роботи системи керування в умовах дисбалансу наведені на рис. 8.

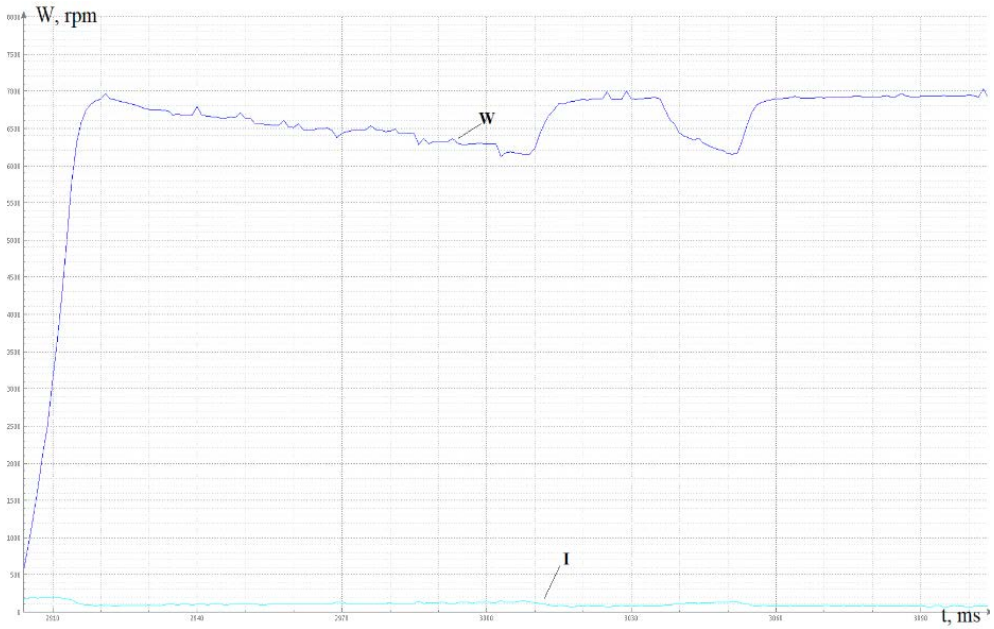


Рис. 8. **Графік запуску системи та відпрацювання в умовах дисбалансу**

Після запуску приводу центрифуги відбувається перевантаження. Система зменшує кількість обертів зі збільшенням струму. Ця дія повторюється двічі, після чого привод виходить на робочий режим. Максимальне значення струму під час перевантаження становить 1,5 А.

На рис. 9 наведено результати досліджень роботи системи в умовах розбалансування та при виникненні перевантаження. Розбалансування відбувається протягом 8 секунд. Після виходу приводу на номінальний режим роботи струм і оберти стабілізуються.

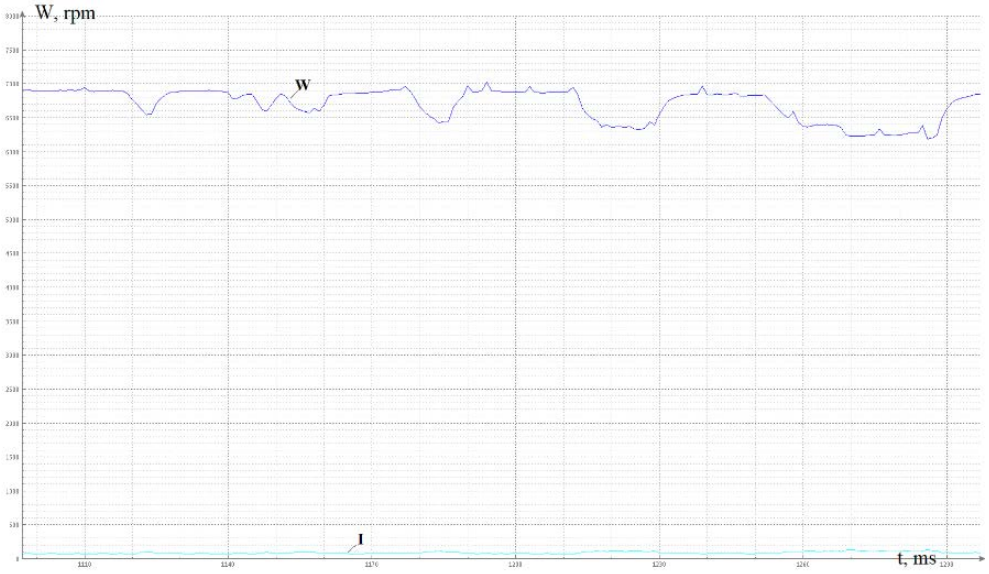


Рис. 9. **Графік роботи системи в умовах дисбалансу**

Висновки. Розроблена комп'ютерно-інтегрована система керування дозволяє стабілізувати роботу центрифуги в умовах дисбалансу. Одночасно зменшується негативний вплив вібрацій на елементи конструкції вертикальних центрифуг за рахунок підтримки кількості обертів на межі з першою критичною швидкістю. Ця дія особливо актуальна при зміні маси робочого тіла центрифуги.

Розроблений алгоритм системи керування зрівноваженням роторів центрифуг в режимі дисбалансу та перевантаження дозволяє поступово стабілізувати кількість обертів, що також унеможливлює роботу приводу з перевантаженням, та подовжує період безаварійної роботи приводу.

Експериментальні дослідження системи керування на виготовленому лабораторному стенді підтвердили працездатність системи керування приводом центрифуги. Дослідження роботи системи керування приводом центрифуги показали високу стабільність роботи наведеного алгоритму, особливо в умовах розбалансування.

References

1. Li, L., Cao, S., Li, J., Nie, R., Hou, L. (2021). Review of Rotor Balancing Methods. *Machines*, 9(5):89.

2. Oke, W., Abido, M., Asafa, T. (2015). Mechanics & Industry Balancing of flexible rotors based on evolutionary algorithms. *Mechanics and Industry*.

3. Myklestad, N. (2018). Fundamentals of vibration analysis. Courier Dover Publications.

4. Burmistenkov, O. P., Pavlenko, V. M. (2017). Analitychne doslidzhennia pralnykh mashyn z tsentryfuhamy, shcho maiut vertykalnu vis obertannia [Analytical study of washing machines with centrifuges

Література

1. Li L., Cao S., Li J., Nie R., Hou L. Review of Rotor Balancing Methods. *Machines*. 2021. 9(5):89.

2. Oke W., Abido M., Asafa T. Mechanics & Industry Balancing of flexible rotors based on evolutionary algorithms. *Mechanics and Industry*. 2015.

3. Myklestad N. O. Fundamentals of vibration analysis. Courier Dover Publications, 2018.

4. Бурмістенков О. П., Павленко В. М. Аналітичне дослідження пральних машин з центрифугами, що мають вертикальну вісь обертання. *Мехатронні системи: інновації*

having a vertical axis of rotation]. *Mekhatronni systemy: innovatsii ta inzhynirynh: Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia = International Scientific and Practical Conference* (June 15, 2017, Kyiv). Kyiv: KNUTD. P. 211–212 [in Ukrainian].

5. Volianyk, O., Gladchuk, O. (2019). Analiz kolyvalnykh protsesiv u vidtsentrovii barabannii pralnii mashyni [Analysis of vibrational processes in a centrifugal drum washing machine]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriia Tekhnichni nauky = Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design, Technical Sciences*, No. 3 (134), P. 18–25 [in Ukrainian].

6. Kostyshyn, V., Kurliak, P. (2011). Bond Graph model asynkhronnoho dvyhuna z vrakhuvanniam nasychennia mahnito-provodu ta efektu vytisnennia strumu v rotori [Bond Graph model of an asynchronous motor with the saturation of the magnetic field and the effect of current displacement in the rotor]. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu = Scientific Bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, № 4 (30), P. 32–37 [in Ukrainian].

7. Kurliak, P. (2020). Application of bond graph method for study of dynamic behavior of electrotechnological complexes. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, Iss. 12, Part 1, P. 59–65.

8. Rodkin, D., Nozhenko, V., Bohatyrov, K. (2017). Electric drive operation modes of above resonance vibration machine. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, P. 140–143.

9. Volianyk, O. (2020). Doslidzhennia vzaiemodii robochykh orhaniv barabana vidtsentrovoi mashyny z obrobliuvanym materialom [Investigation of interaction of drum operation device of the centrifugal machine with the processed material]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriia Tekhnichni nauky = Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design, Technical Sciences*, No. 5 (150), P. 14–23 [in Ukrainian].

10.Device for automatic balancing of central machines: pat. 153420 Ukraine, G01M 1/14, G01M 1/30, G01M 1/38. No. u202202982; announced on 08/17/2022; published on 07/05/2023, Bull. No. 27/2023

11.Borutzky, W. (2011). Bond graph modelling of engineering systems (Vol. 103). New York: Springer.

та інжиніринг: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. (15 червня 2017 р., м. Київ). К.: КНУТД, 2017. С. 211–212.

5. Воляник О. Ю., Гладчук О. З. Аналіз коливальних процесів у відцентровій барабанній пральній машині. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2019. № 3 (134). С. 18–25.

6. Костишин В. С., Курляк П. О. Bond Graph модель асинхронного двигуна з врахуванням насичення магнітопроводу та ефекту витіснення струму в роторі. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2011. № 4(30). С. 32–37.

7. Kurliak P. Application of bond graph method for study of dynamic behavior of electrotechnological complexes. *Modern Engineering and Innovative Technologies.* 2020. Iss. 12. Part 1. P. 59–65.

8. Rodkin D., Nozhenko V., Bohatyrov K. Electric drive operation modes of above resonance vibration machine. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 140–143.

9. Воляник О. Ю. Дослідження взаємодії робочих органів барабана відцентрової машини з оброблюваним матеріалом. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2020. № 5 (150). С. 14–23.

10.Пристрій автоматичного балансування відцентрових машин: пат. 153420 Україна, G01M 1/14, G01M 1/30, G01M 1/38. № u202202982; заявлено 17.08.2022; опубліковано 05.07.2023, бюл. № 27/2023.

11. Borutzky W. Bond graph modelling of engineering systems (Vol. 103). New York: Springer, 2011.

PAVLENKO VOLODYMYR
Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor, Dean, Faculty of Mechatronics and Computer Engineering, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-2163-8508
Scopus Author ID: 57357228600
Researcher ID: B-7133-2017
E-mail: pavlenko.vm@knutd.edu.ua

KURLIAK PETRO
Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor, Head of Department of Electrical Power Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-8113-5211
Scopus Author ID: 57214242215
E-mail: petro.kurliak@nung.edu.ua

VOLIANYK OLEKSII
Candidate of Sciences in Engineering, Assistant Professor, Head of Department of Mechanical Engineering, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-7278-0910
Scopus Author ID: 57915800600
Researcher ID: I-7967-2018
E-mail: volyanyk.oy@knutd.edu.ua

[1] **PAVLENKO V.,** [2] **KURLIAK P.,** [1] **VOLIANYK O.**
[1] *Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine*
[2] *Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ukraine*

DESIGNING A CONTROL SYSTEM FOR MECHANISMS WITH VARIABLE IMBALANCE

Purpose. *Conducting analytical and experimental research, developing a control system for mechanisms with a variable imbalance. Investigation of operating modes, verification of the operation algorithm and determination of steady states of the unbalanced mechatronic system. Determination of dependencies that describe the nature of the load on the working bodies.*

Methodology. *Methods of mathematical modelling of mechatronic systems by constructing Bond Graph, algorithmic design, experimental study with data collection were used.*

Results. *An analytical review of the nature of formation and methods of decreasing imbalance in unstable mechatronic systems is carried out, and a system for automatic control of rotor balancing using digital monitors in centrifuges with variable imbalance is developed and proposed. The control system includes a microcontroller, a Hall sensor, and a BondGraph model for modelling the operation of an induction motor. An algorithm was developed for the control program, which, according to the set parameters, checks the nominal and critical current values in the centrifuge drive. The current value is recorded and fluctuations are monitored. If the current increases, the system reduces the speed by 10% to reduce the amplitude of oscillations in transient rotation modes, while continuing to monitor the permissible current limit and motor load.*

Scientific novelty. *The article analyses aspects of emergence and studies regulation of unbalanced systems. A structural diagram of the control system for rotary mechanisms with the use of digital monitoring is proposed. The system control algorithm is developed. The study of unstable states using BondGraph computer modelling methods was carried out.*

Practical significance. *As a result of the analytical study, the phenomenon of imbalance in mechatronic systems was considered. An experimental model for controlling unbalance in rotary centrifugal mechanisms was designed and implemented. The results and conclusions obtained can be used in the design of centrifugal machines in various industries.*

Keywords: *unbalance control system; vibrations; BondGraph; balancing.*

ISSN 2786-5371 print
ISSN 2786-538X online
Технології та інжиніринг, № 6(17), 2023

https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.5

УДК 678.027.3

ПОЛІЩУК А. О.
Хмельницький національний університет, Україна

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ КОРПУСУ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА 3D-ПРИНТЕРА

Мета. *Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера, яка спрямована на зменшення перегріву полімерного матеріалу під час екструзії та підвищення точності і якості друку готових деталей.*

Методика. *У роботі для реалізації висунутих завдань і перевірки сформульованих гіпотез було використано комплекс методів: теоретичний, емпіричний та статистичний. Теоретичні та експериментальні дослідження базувалися на фундаментальних знаннях в області галузевого машинобудування, теплотехніки, а також враховувалися особливості та вимоги, пов'язані з переробкою полімерів. Математичне опрацювання результатів дослідження здійснювалося за допомогою програмного забезпечення MS Excel.*

Результати. *Розроблено систему охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера з використанням матеріального циліндра з ребрами для тепловідведення, двома вентиляторами та тепловим бар'єром. Виготовлено термоізолюючі прокладки (бар'єри) для екструдера 3D-принтера з силікону, тефлону (фторопласту 4) та флубону. Досліджено їх теплопровідність. З використанням SolidWorks Simulation виконано статичний та перехідний термічні аналізи системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера. Розроблено вимірювальну систему для встановлення температури шнекового екструдера в п'яти точках. Проведено експериментальні дослідження по визначенню температури в різних місцях шнекового екструдера: на соплі; на нагрівальному елементі; на охолоджуючих ребрах матеріального циліндра; під теплоізоляційною прокладкою; всередині завантажувального бункера та на його корпусі. Побудовано графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера при використанні різних елементів охолоджуючої системи. Здійснено порівняння температур шнекового екструдера, визначених теоретично з використанням SolidWorks Simulation та експериментально з використанням вимірювальної системи та тепловізійної камери.*

Наукова новизна. *Встановлено раціональні співвідношення між елементами системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера, які дозволяють запобігти перегріву екструдера та підвищити якість процесу екструзії та виготовлення готових виробів.*

Практична значимість. *Розроблено систему охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера, яка дозволить значно підвищити ефективність та надійність процесу 3D-друку. Така система також сприятиме збільшенню довговічності обладнання, зниженню виробничих витрат шляхом попередження дефектів у виробах 3D-друку, пов'язаних з температурними коливаннями, та покращенню їх якості. Крім того, ефективне охолодження дасть змогу використовувати більш широкий спектр полімерних матеріалів, включаючи ті, що мають вищі вимоги до температурного режиму, тим самим розширюючи можливості 3D-друку та забезпечуючи більшу гнучкість у виробництві.*

Ключові слова: *3D-принтер; 3D-друк; шнековий екструдер; система охолодження; теплобар'єр; термоізолююча прокладка; SolidWorks Simulation; датчик температури; тепловізійна камера.*

Вступ. При екструзії полімерних матеріалів важливим питанням є перегрів шнекового екструдера, який може негативно вплинути на якість друку та довговічність обладнання. Це питання можна вирішити шляхом розробки та впровадження ефективної системи охолодження, яка може включати вентиляційні системи, радіатори чи рішення на базі рідинного охолодження. Така система дозволить активно контролювати температуру екструдера, забезпечуючи оптимальні умови для плавлення полімеру, знижуючи ризик перегріву та забезпечуючи більшу однорідність і точність виробів. Крім того, використання

передових матеріалів з високою теплопровідністю для конструкції екструдера може допомогти в розсіюванні надлишкового тепла, забезпечуючи додаткову безпеку та ефективність процесу.

Під час роботи корпус екструдера 3D-принтера нагрівається до певної температури. Тепло утворюється за рахунок роботи електронагрівача, який знаходиться в алюмінієвому нагрівальному блоці. Він розміщений в нижній частині матеріального циліндра. Оскільки алюміній є дуже хорошим провідником з теплопровідністю 209,3 Вт/м·К [1], а циліндр/охолоджувач екструдера виготовлено з однієї суцільної металевої заготовки зі сталей 40 або 40Х з теплопровідністю 74,4 Вт/м·К [1, 2], то тепло дуже швидко передається з нижньої частини у верхню. Воно також виникає через внутрішні сили тертя, створені рухом шнека всередині циліндричної оболонки. Під час обертання шнека його лопаті переміщують гранульований полімер вздовж ствола, при цьому матеріал треться об корпус циліндра та шнека, що призводить до виділення тепла. Перевищення температури нагрівання корпусу може негативно вплинути на процес екструзії полімеру та виготовлення готового виробу. Гранули полімерів можуть розплавитися під впливом тепла, яке виділяється від екструдера під час роботи. Охолодження корпусу перед завантаженням допомагає уникнути небажаного розплавлення гранул перед тим, як вони навіть потраплять в екструдер. Під час завантаження гранул до екструдера можуть виникнути великі температурні градієнти. Охолодження корпусу допомагає зберегти стабільність температури та забезпечує ефективну роботу екструдера під час завантаження. Висока температура може вплинути на деякі частини екструдера, зокрема на ті, що виготовлені із полімерного матеріалу. Це, в свою чергу, може призвести до їхньої деформації або пошкодження. Охолодження допомагає зберегти ці елементи в нормальному стані. Завантаження гранул у високотемпературний екструдер може бути небезпечним і призвести до опіків або травм. Зменшення температури корпусу під час завантаження сприяє безпечнішому виконанню цієї операції. З урахуванням цих факторів охолодження корпусу екструдера перед завантаженням гранул стає важливим аспектом для забезпечення безпечного та ефективного процесу друку на 3D принтерах.

Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера має велике практичне значення, оскільки вона сприяє підвищенню надійності та продуктивності процесу 3D-друку за рахунок запобігання перегріву екструдера. Така система дозволяє використовувати ширший спектр полімерних матеріалів, включаючи ті, які вимагають низьких температур обробки, тим самим забезпечуючи енергоефективність та екологічність процесу. Крім того, вона знижує ризик травм та пошкодження обладнання, вносячи важливий вклад у інноваційний розвиток технології 3D-друку і роблячи виробничий процес більш гнучким та масштабованим.

Постановка завдання. Розробити систему охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера та забезпечити її сумісність з існуючими конструкціями 3D-принтерів.

Результати дослідження. Хотенд (англ. hotend) у контексті 3D-друку – це ключова частина екструдера, яка відповідає за нагрівання та розплавлення мононитки до необхідної температури для подальшого її екструдування через сопло. Хотенд є критичною складовою для будь-якого 3D-принтера, що працює за технологією Fused Deposition Modeling (FDM) [3, 4].

У шнековому екструдері для 3D-принтера, який використовує гранули або подрібнені частки полімеру, еквівалентом хотенду є зона плавлення полімеру. Таким чином, у шнековому екструдері зона плавлення полімеру виконує функції хотенда, забезпечуючи нагрівання, плавлення, гомогенізацію та подачу розплавленого полімеру до сопла для 3D-друку.

Контроль температури хотенда (зони плавлення) необхідний для підтримки якості друку. Сильна флуктуація може спричинити блокування гарячого кінця, отже, розриви в потоці матеріалу, що впливає на якість виготовлених деталей [5]. Також важливо зменшити втрати тепла від гарячого блоку до верхньої частини екструдера та уникнути деформацій при підвищених температурах у пластикових деталях, які використовуються в екструзійному блоці.

Аналіз наукових праць показав, що більшість робіт в цьому напрямку стосуються хотенда. Роботи по дослідженню нагрівання шнекового екструдера практично відсутні. Тому за основу досліджень можна розглянути наукові праці, що стосуються теплової поведінки хотенда та оптимізації його конструкції. Роботи [6, 7] присвячені розробці моделей кінцевого елементного аналізу для розуміння впливу геометричних параметрів хотенда на механічні змінні процесу друку, такі як перепад тиску розплавленого матеріалу, потоку матеріалу і товщини шару. Результати, надані цими авторами, вказують на високий зв'язок між геометрією сопла для друку та якістю друку. Крім того, вони відмічають, що основним компонентом, який визначає термічну поведінку екструдера, є теплорозривник (теплоізолятор), присутній у деяких проаналізованих конструкціях 3D-принтерів. Саме питанню використанню теплоізолятора в хотенді присвячена робота [8]. Наявність теплорозриву веде до зменшення теплопровідності матеріалу на вході в тепловий блок та призводить до кращого використання енергії за рахунок зменшення розсіювання тепла.

В роботі [9] використовується метод скінчених елементів для перевірки теплових характеристик екструдера 3D-принтера з відкритим кодом. В науковій праці [10] досліджується вплив потоку, що створюється вентилятором, з'єднаним з екструдером на механізми теплопередачі під час процесу друку. В роботі [11] проводяться дослідження по впливу геометрії радіатора на продуктивність охолодження, а в праці [12] здійснюється аналіз впливу геометрії сопла примусової вентиляції на розподіл тепла в хотенді.

В першій моделі розробленого екструдера 3D-принтера, що друкує гранулами або подрібненими відходами полімерів охолодження корпусу відбувалося за рахунок розміщених на матеріальному циліндрі ребер для охолодження. Охолоджуючі ребра знаходяться на матеріальному циліндрі у верхній частині екструдера. Розроблена модель матеріального циліндра з ребрами повітряного охолодження в програмному середовищі SolidWorks наведена на рис. 1, а його загальний вигляд – на рис. 2 [13].

Рис. 1. **Модель SolidWorks матеріального циліндра з ребрами повітряного охолодження**

Рис. 2. **Загальний вигляд матеріального циліндра з ребрами повітряного охолодження**

Основне їх призначення – це збільшення площі поверхні циліндра у місці надходження полімерного матеріалу у шнек. Таким чином збільшувалася площа тепловіддачі та підвищувалася ефективність охолодження. Таке розташування повинно було запобігти потраплянню тепла в бункер і частковому плавленню гранул полімеру, які не потрапили в порожнину між матеріальним циліндром та шнеком. В результаті при роботі з пластиками TPU, PLA, ABS відбувалося злипання матеріалу і блокування його транспортування в зону

пластифікації екструдера [14]. В один момент певні пластикові деталі бункера почали плавитися через велику кількість тепла, що утворилося навколо ребер. Регулювання температурного режиму нагрівача позитивних результатів не принесло.

Таким чином використання металевих ребер було недостатньо ефективним.

В подальшому для поліпшення їхньої тепловіддачі було запропоновано використати потік повітря від вентилятора. Він спрямовує повітря на нагріту деталь обладнання, допомагаючи відводити тепло в навколишнє середовище.

Охолодження екструдера за допомогою потоку повітря від вентилятора є досить ефективним методом і має декілька переваг: розсіювання тепла; зменшення перегріву полімерного матеріалу та збереження його якості, а саме фізичних та хімічних властивостей; забезпечення продуктивності за рахунок стабільної роботи екструдера; можливість керування температурою. За допомогою вентилятора можна регулювати температуру в окремих зонах екструдера, що дозволяє досягти більш точного керування процесом екструзії.

Отже, використання потоку повітря від вентилятора для охолодження екструдера є важливим і ефективним способом забезпечення оптимальних умов роботи обладнання та підвищення якості продукції.

Вентилятор турбінного типу 1 потужністю 1,2 Вт та габаритними розмірами 50х50 мм для обдування ребер було розміщено у верхній частині корпусу екструдера (рис. 3). Для направлення потоку повітря для обдуву ребер циліндра, з використанням програмного середовища SolidWorks було спроектовано направляюче сопло 2 [13].

1 – турбінний вентилятор
2 – направляюче сопло

Рис. 3. **Екструдер з повітряним охолодженням за допомогою вентилятора**

При друку гранулами ABS пластику в деяких випадках відбувалося їх злипання. Це призвело до зниження продуктивності екструдера та стабільної його роботи.

Наступні вдосконалення системи охолодження перегрітої частини корпусу екструдера полягали у встановленні додаткового вентилятора, який би спрямовував потік повітря у завантажувальний бункер та додавання теплового бар’єру.

Встановлення теплового бар'єру між нагрітим корпусом екструдера та бункером може мати кілька переваг і бути цілком обґрунтованим:

- зменшення теплопередачі. Тепловий бар'єр на основі теплоізоляційного матеріалу або ізольованої стінки, може допомогти знизити передачу тепла від нагрітого корпусу екструдера до бункера. Це дозволить підтримувати більш стабільну температуру в бункері і запобігатиме надлишковому нагріванню матеріалу;

- зниження енерговитрат. Зменшення теплопередачі може призвести до зниження витрат енергії на підтримку температури в матеріальному циліндрі. Це може бути важливим з точки зору енергоефективності та економії ресурсів;

- збереження якості матеріалу. Передача зайвого тепла в бункер може вплинути на якість матеріалу, особливо якщо це пластичний полімер. За допомогою теплового бар'єру можна забезпечити більш стабільні умови транспортування полімерного матеріалу в зону пластифікації матеріального циліндра та подальшого його дозування в розплавленому вигляді;

- запобігання можливим пошкодженням. Надлишкове нагрівання бункера може вплинути на його цілісність та тривалість служби. Встановлення теплового бар'єру може допомогти запобігти можливим пошкодженням корпусу бункера.

Отже, встановлення теплового бар'єру між нагрітим корпусом екструдера та бункером є обґрунтованим, оскільки воно сприяє зниженню теплопередачі, збереженню якості матеріалу та енергоефективності процесу.

Додавання теплового бар’єру повністю відокремлює бункер від зони розплаву матеріального циліндра. В якості бар’єру було вибрано три матеріли: силікон, тефлон та флубон.

Силікон (силіконова гума) – це еластичний полімерний матеріал, який виготовляється на основі високомолекулярних сполук кремнію з органічними речовинами [15]. Він володіє рядом унікальних властивостей, які роблять його популярним і використовується в різних галузях промисловості і виробництва. Основні властивості силікону включають [15, 16]:

- термостійкість. Силікон володіє високою термостійкістю до 280 °C, а короткочасно і 300°C [15]. Він може переносити високі температури без втрати структури або властивостей. Це робить його ідеальним для використання в умовах високих температур, що є актуальним для його використання в екструдері 3D-принтера в якості теплового бар’єру;

- гнучкість і еластичність. Силікон є гнучким і еластичним матеріалом, який може зберігати свою м'якість і пружність при різних температурах. Це дозволяє використовувати його в таких застосуваннях, де потрібна гумова герметизація або амортизація ударів. Це, в свою чергу, може гасити вібраційні процеси, які можуть виникати при переміщені екструдера при 3D-друку;

- водовідштовхувальність. Силікон є водонепроникним матеріалом, і він володіє високою стійкістю до вологи та рідин. Це може бути актуальним питанням при 3D-друку різноманітними пастами та сумішами [17–19];

- стійкість до ультрафіолетового випромінювання. Силікон не втрачає своїх властивостей під впливом ультрафіолетового випромінювання, що робить його відмінним для використання в екструдері 3D-принтера, на який можливе попадання сонячних променів;

- безпечність для здоров'я. Силікон вважається безпечним для здоров'я і не містить шкідливих речовин, що можуть виділятися при підвищених температурах;

- хімічна стійкість. Матеріал володіє хімічною стійкістю і не взаємодіє з багатьма речовинами, включаючи кислоти і луги, що може бути актуальним при 3D-друку композиційними сумішами.

Політетрафторетилен (PTFE), також відомий як тефлон, є важливим полімерним матеріалом з численними унікальними властивостями [20, 21]. Розглянемо деякі його основні характеристики [21–23]:

- низька схильність до прилипання. Тефлон має дуже низьку енергію поверхні, що робить його неклейким. Він також має високий коефіцієнт ковзання. Ця властивість робить PTFE ідеальним матеріалом для використання в бункері екструдера;

- висока термічна стійкість. Матеріал витримує дуже високі температури, без розкладання. Він може витримувати температури вище 300 ^{0}C без зміни своїх хімічних властивостей [23];

- низька теплопровідність. Ця особливість робить його важливим матеріалом для багатьох застосувань, де потрібна термоізоляція при високих температурах. Теплопровідність фторопласту дуже низька. Вона зазвичай знаходиться на рівні природних матеріалів, таких як дерево чи бамбук та складає 0,252 Вт/м·К [23]. У випадку застосування в екструдері 3D-принтера даний матеріал буде відмінним термоізолятором від тепла та стійким до високих температур;

- мінімальне теплове розширення. Тефлон має дуже низький коефіцієнт теплового розширення, що означає, що він не розширюється або звужується при зміні температури. Температурний коефіцієнт лінійного розширення для нього складає $1 \cdot 10^{-5}/°C^{-1}$ [21]. Це важливо для деяких застосувань, де точність розмірів є критичною. При його використанні в екструдері 3D-принтера, який є малогабаритним, питання точності розмірів є актуальним;

- висока міцність. Незважаючи на те, що PTFE має низьку міцність в порівнянні з деякими іншими полімерами, він все одно досить міцний і має високу стійкість до зношування. Межа міцності на розрив для нього складає 14,0 МПа [23]. При використанні в екструдері у якості ізолюючої прокладки він не буде піддаватися великим динамічним навантаженням. Тому його в даному випадку можна використовувати;

- відмінна хімічна стійкість. PTFE стійкий до багатьох хімічних речовин, включаючи кислоти, луги і багато розчинників [20]. Ця хімічна стійкість робить його важливим матеріалом для обладнання, яке контактує з агресивними речовинами. Це є актуальним питанням при 3D-друку композиційними сумішами [24].

Завдяки своїм унікальним властивостям PTFE широко використовується в різних галузях, включаючи хімічну промисловість, автомобільну промисловість, електроніку тощо [21, 23].

Антифрикційний матеріал флубон – полімерний композиційний матеріал на основі політетрафторетилену, сополімерів етилену і тетрафторетилену і інших фтормістких полімерів, модифікованих вуглецевих волокон і інших волокнистих і дисперсних наповнювачів.

Вуглефторопласт (CFFC), який часто називається флубоном – це високополімерний композиційний матеріал із групи фторованих полімерів. Літерна абревіатура CFFC розшифровується з англ. carbon fiber fluon composition – вуглеволокниста фторопластова композиція [25]. Вони складаються з фторопласту, наповненого вуглецевими волокнами в певному відсотковому відношенню.

Лабораторія полімерних композиційних і мастильних матеріалів Хмельницького національного університету єдина в Україні, яка займається створенням та виготовленням різних марок композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену, сополімерів етилену і тетрафторетилену та інших полімерів, що вміщують фтор та модифікованих вуглецевих волокон і інших дисперсних і волокнистих наповнювачів. Лабораторією випускається флубон двокомпонентним і багатокомпонентним. Науковцями створено декілька марок матеріалу: 15, 20, 15МВ, 15/20, К15УВ5, ДМ, ДМГ-С1, ДМ-Б [26].

На даний час існує мало технічної літератури, яка б описувала властивості флубону, але аналіз існуючої дав змогу визначити декілька його характеристик:

- відмінна хімічна стійкість. Вуглефторопласти володіють високою стійкістю до хімічних агентів, включаючи корозію від кислот, лугів, розчинників та інших агресивних речовин. Ця характеристика робить їх ідеальними для використання в агресивних середовищах;

- висока термічна стійкість. Вуглефторопласти здатні витримувати високі температури без деформації чи розплавлення;

- низька теплопровідність. Теплопровідність флубону знаходиться в межах теплопровідності фторопласту;

- мінімальне теплове розширення. Додавання вуглецевих волокон в фторопласт дозволило зменшити теплове розширення композиційного матеріалу;

- висока міцність. Введення в склад композиційного матеріалу вуглецевих волокон дозволяє покращити міцність. Вуглеволокниста фторопластова композиція має кращий показник міцності на розривання;

- низький коефіцієнт тертя. Вони мають низький коефіцієнт тертя, що робить їх добрими змащувальними матеріалами;

- високі антифрикційні властивості. При введенні вуглецевих волокон антифрикційні властивості фторопласту підвищуються в 2000 разів.

- водонепроникність. Флубони не вбирають воду і мають дуже низький коефіцієнт водопоглинання.

Ці властивості роблять вуглефторопласти, включаючи флубон, популярними матеріалами в різних галузях, таких як хімічна промисловість, електротехніка, галузеве машинобудування, медицина та інші.

Загалом, технічні характеристики фторопласту 4 і флубону подібні. Обидва матеріали є високоякісними полімерами з відмінними властивостями, які використовуються в різних галузях промисловості і науки та можуть бути використанні в якості теплового бар'єру в екструдері 3D-принтера.

З метою проведення експериментальних досліджень було виготовлено термоізолюючі прокладки (бар'єри) для екструдера 3D-принтера товщиною 2 мм та габаритними розмірами 37х37 мм. Така товщина обумовлена габаритними розмірами екструдера змодельованого в програмному середовищі SolidWorks [13].

Прокладку із силікону було виготовленої із силіконової пластини товщиною 20 мм (рис. 4,а). Термобар'єр з фторопласту 4 було виготовленої з фторопластової пластини товщиною 20 мм (рис. 4,б). Вуглефторопластову прокладку для шнекового екструдера було виготовлено з флубону 15 в лабораторії полімерних композиційних і мастильних матеріалів Хмельницького національного університету (рис. 4,в).

а) силіконова гума

б) фторопласт 4

в) флубон 15

Рис. 4. **Термоізолюючі прокладки**

З метою визначення того, який із зазначених матеріалів (рис. 4) має найменшу теплопровідність було проведено експериментальні дослідження. Їх суть полягала в наступному. Теплоізоляційні матеріали встановлювалися на робочу платформу 3D-принтера Anycubic 4 Max Pro 2.0 [27]. Було вибрано саме цю модель принтера у зв'язку з тим, що він має закритий корпус. Наявність закритого корпусу дає змогу стабілізувати температуру всередині та проводити експериментальні дослідження при сталому режимі нагрівання.

За допомогою налаштувань пристрою було встановлено температуру нагріву 50 ^{0}C. Теплоізоляційні прокладки розміщувалися на платформі принтера (рис. 5).

Після стабілізації температури їх нагріву було проведено вимірювання температури робочого столу та зовнішніх поверхонь кожної із них. Візуальне зображення нагрівання

прокладок було знято за допомогою тепловізійної камери Walcom HT-03 [28]. Результати вимірювання представлено на рис.6.

Аналізуючи отримані знімки можна побачити, що температура нагрівального столу в місцях вимірювання коливалася від 51,4 ^{0}C до 51,9 ^{0}C. Температура зовнішніх поверхонь теплоізолюючих прокладок становила: силікон 47,9 ^{0}C; фторопласт 47,1 ^{0}C; флубон 43,8 ^{0}C. Визначивши різницю температур було встановлено кількість тепла, що затримується у теплобар'єрі: з флубону 7,8 ^{0}C; з фторопласту 4,3 ^{0}C, з силікону 4,3 ^{0}C.

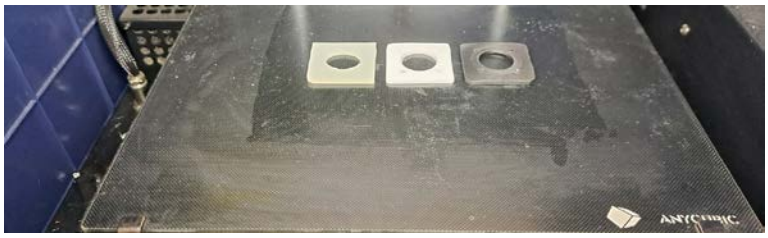
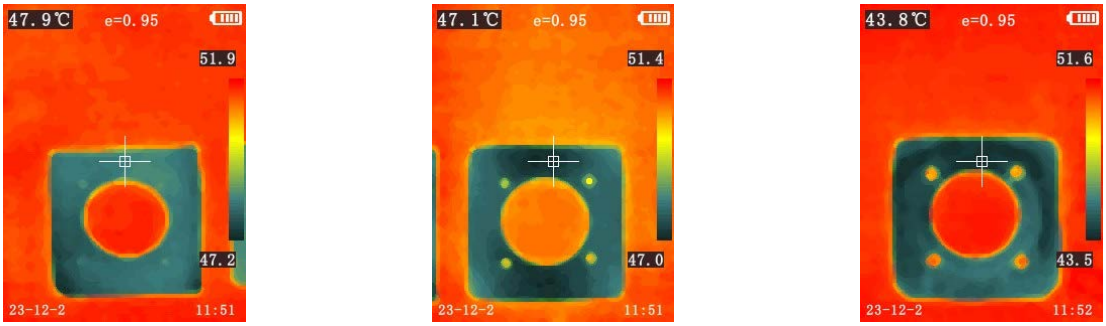


Рис. 5. **Розміщення теплоізоляційних прокладок на платформі 3D-принтера**



а) силікон б) фторопласт 4 в) флубон 15

Рис. 6. **Візуальне зображення нагрівання прокладок**

Виходячи з цього можна зробити висновок про те, що коефіцієнт теплопровідності флубону найменший, хоча в технічній літературі наводиться інформація, що у фторопласта 4 коефіцієнт теплопровідності (0,252 Вт/м·К) [23] менший порівняно з флубоном 15 (0,34…0,37 Вт/м·К) [26]. Встановлення кількісних показників коефіцієнта теплопровідності матеріалів не є предметом даної роботи. Ефективність термобар'єрів із зазначених матеріалів було перевірено на реальному об'єкті – шнековому екструдері.

Загальний вигляд екструдера зі встановленим додатковим вентилятором потужністю 40 Вт і габаритними розмірами 40х40 мм приведено на рис. 7, а із термоізолюючою прокладкою на рис. 8.

Для виконання статичних та перехідних термічних аналізів системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера було використано програмне середовище SolidWorks, а саме додаток SolidWorks Simulation. SolidWorks Simulation – це потужний інструмент для проведення комплексного аналізу напружень, деформацій, втоми матеріалів, а також термічного аналізу в рамках CAD-середовища SolidWorks [29].

Такий підхід дозволяє детально вивчити термічні властивості та поведінку кожного варіанту конструкції шнекового екструдера під час експлуатації, забезпечуючи важливу інформацію для його оптимізації.

Статичний термічний аналіз дозволяє зосередитися на оцінці стабільного стану теплопровідності екструдера. Він дає змогу визначити розподіл температури по всій конструкції при певних стабільних умовах, наприклад, коли екструдер працює з постійною температурою протягом тривалого часу.

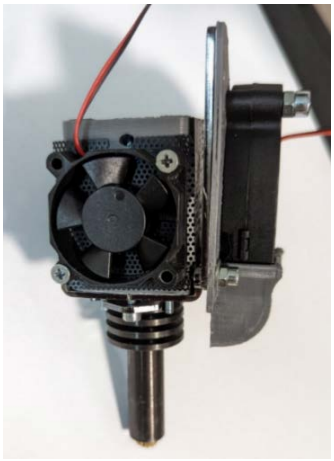
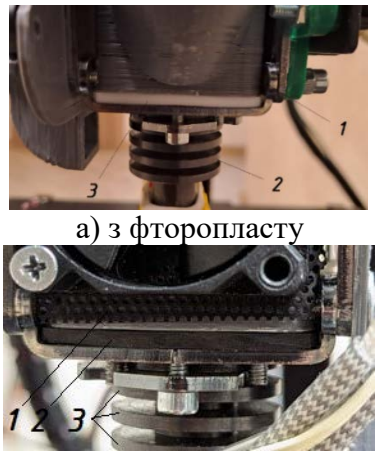


Рис. 7. **Загальний вигляд екструдера зі встановленим додатковим вентилятором**



а) з фторопласту

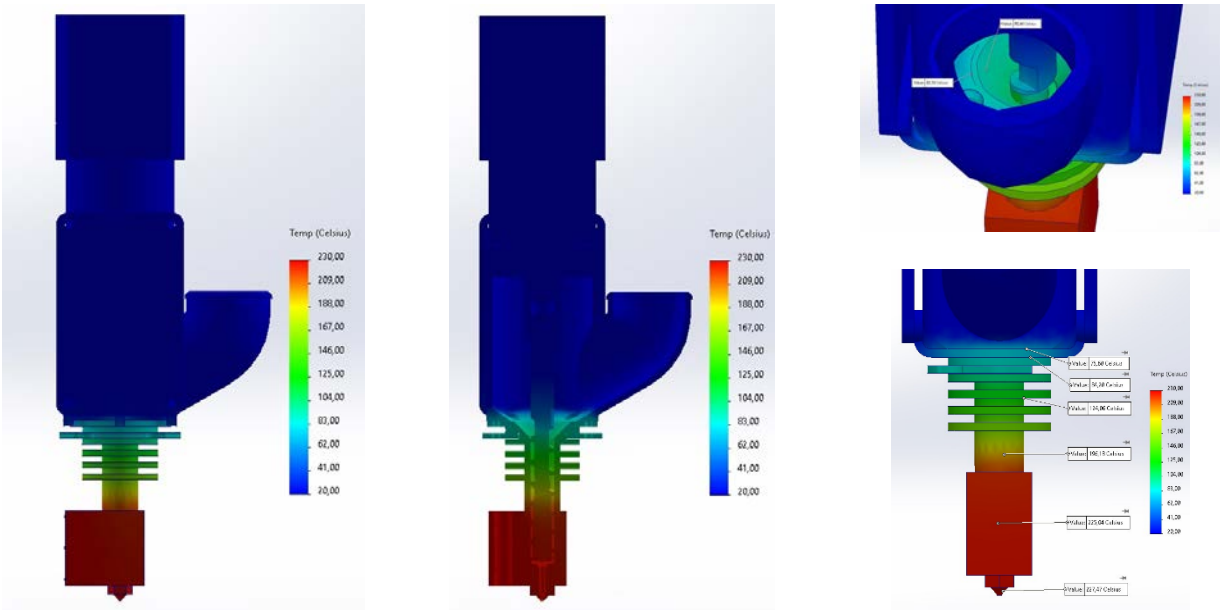
б) з флубону

1 – завантажувальний бункер;
2 – охолоджуючі ребра;
3 – термоізолююча прокладка

Рис. 8. **Загальний вигляд екструдера зі встановленою термоізолюючою прокладкою**

Перехідний термічний аналіз дозволяє оцінити, як конструкція буде реагувати на зміни температури з часом. Це включає аналіз змін теплопровідності під час розігріву, охолодження та інших динамічних теплових процесів.

За допомогою SolidWorks Simulation було створено моделі охолодження шнекового екструдера з використання матеріального циліндра з ребрами для розсіювання тепла (рис. 9); з повітряним охолодженням за допомогою вентилятора (рис. 10), з додатковим повітряним вентилятором та з використанням теплового бар'єру у вигляді прокладки з трьох різних матеріалів: силікон, фторопласт 4, флубон 15 та проведено їх аналіз (рис. 11–13).



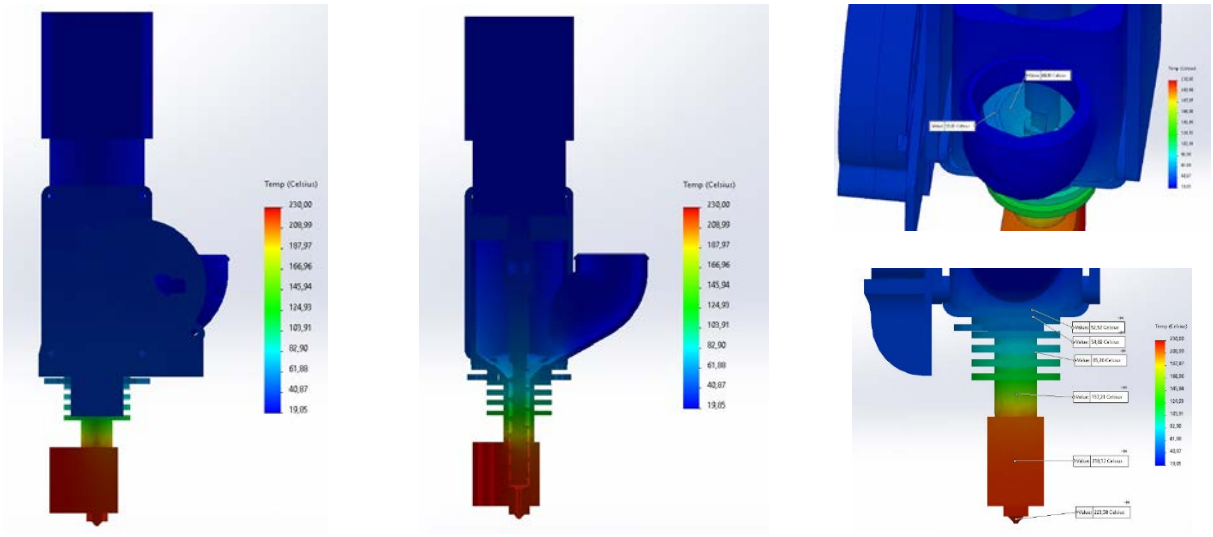
а) суцільний

б) в розрізі

в) значення температури в точках вимірювання

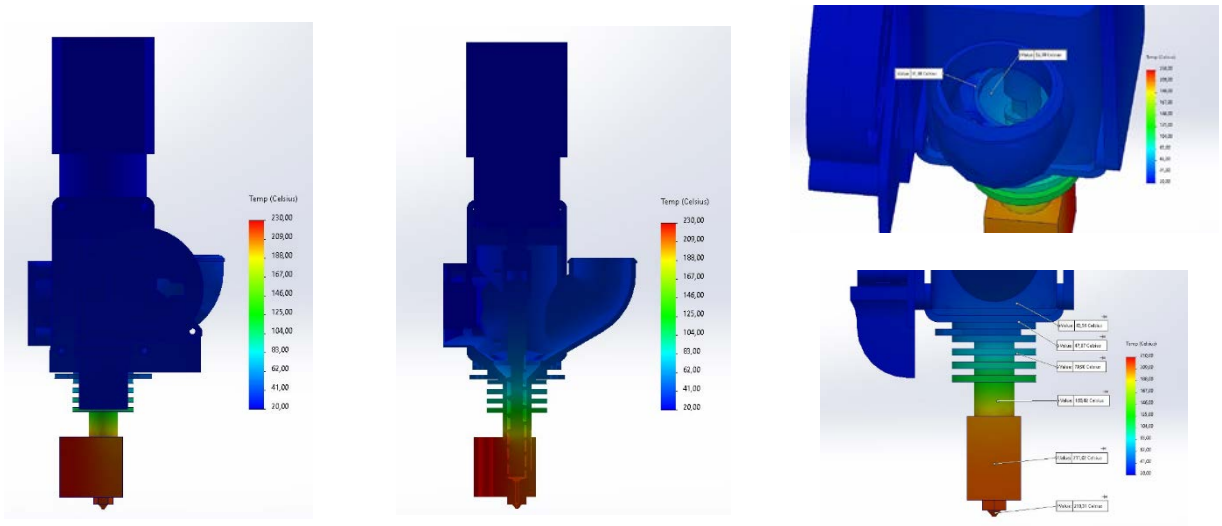
Рис. 9. **Зміна температури в шнековому екструдері при наявності ребер для розсіювання тепла на матеріальному циліндрі**

Для подальшої теплоізоляції шнекового екструдера нагрівальний елемент було обгорнуто фум-стрічкою та каптоновим скотчем (рис. 14). Основний компонент матеріалу стрічки – фторопласт-4, який є найбільш щільним серед усіх типів фторопластів і є важкогорючим. Цей матеріал, як вже відмічалося вище, здатний витримувати високі температури [30].



а) суцільний б) в розрізі в) значення температури в точках вимірювання

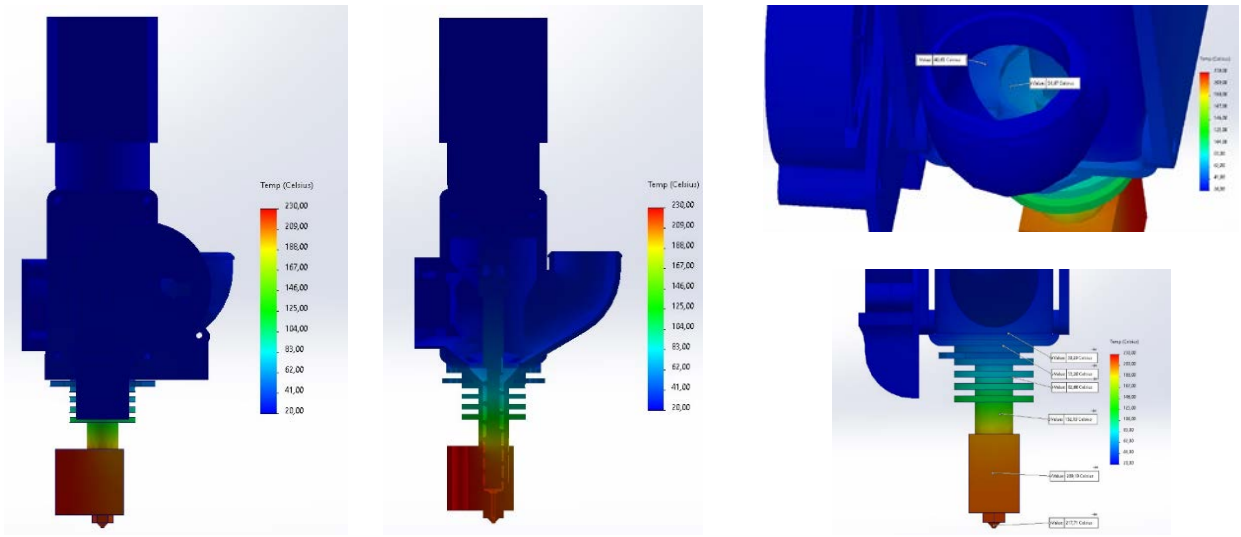
Рис. 10. **Зміна температури в шнековому екструдері при повітряному охолодженні за допомогою вентилятора**



а) суцільний б) в розрізі в) значення температури в точках вимірювання

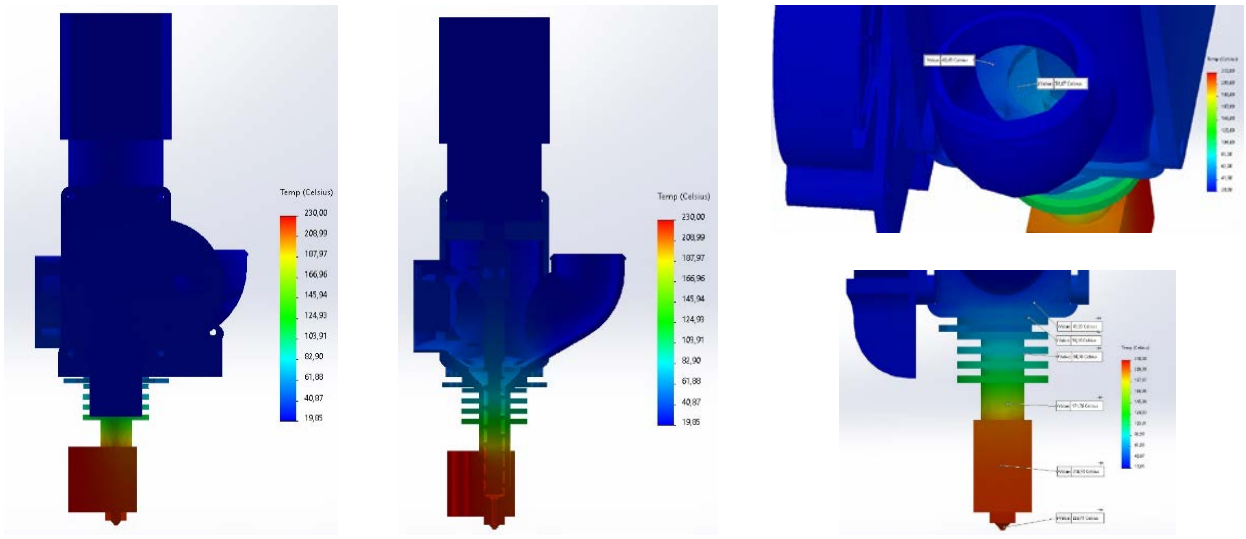
Рис. 11. **Зміна температури в шнековому екструдері при повітряному охолодженні за допомогою двох вентиляторів та теплового бар'єру у вигляді прокладки з силікону**

Каптоновий скотч є матеріалом з високою термічною стійкістю, який широко використовується в 3D-принтерах в якості покриття для робочого столу та ізоляції нагрівального блоку та проводів нагрівального елементу хотенда [31].



а) суцільний б) в розрізі в) значення температури в точках вимірювання

Рис. 12. **Зміна температури в шнековому екструдері при повітряному охолодженні за допомогою двох вентиляторів та теплового бар'єру у вигляді прокладки з фторопласту 4**



а) суцільний б) в розрізі в) значення температури в точках вимірювання

Рис. 13. **Зміна температури в шнековому екструдері при повітряному охолодженні за допомогою двох вентиляторів та теплового бар'єру у вигляді прокладки з флубону 15**

Були проведені експерименти по визначенню температури шнекового екструдера. З цією метою було розміщено 5 датчиків температури в різних його точках, зокрема: на нагрівальному елементі; на охолоджуючому радіаторі; під прокладкою теплового бар’єру; всередині завантажувального бункера; на зовнішній стороні корпуса бункера вище термопрокладки (рис. 15).

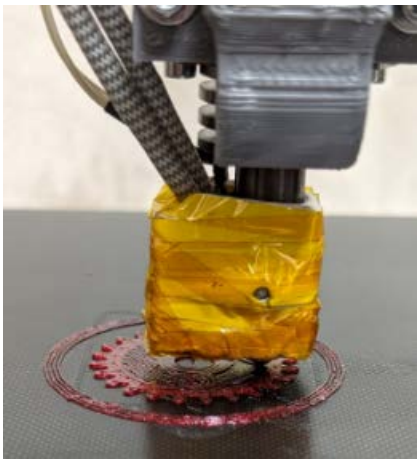


Рис. 14. **Нагрівальний блок з тепловою ізоляцією**

В якості датчиків було вибрано терморезистори NTC 3950 з опором 100 кОм [32]. Шнековий екструдер зі встановленими датчиками температури представлено на рис. 10.

Використовуючи мікроконтролер Arduino UNO R3 було зібрано вимірювальну систему для визначення температури шнекового екструдера [33]. Дана система представлена на рис. 16.

Рис. 15. **Шнековий екструдер з під'єднаними терморезисторами**

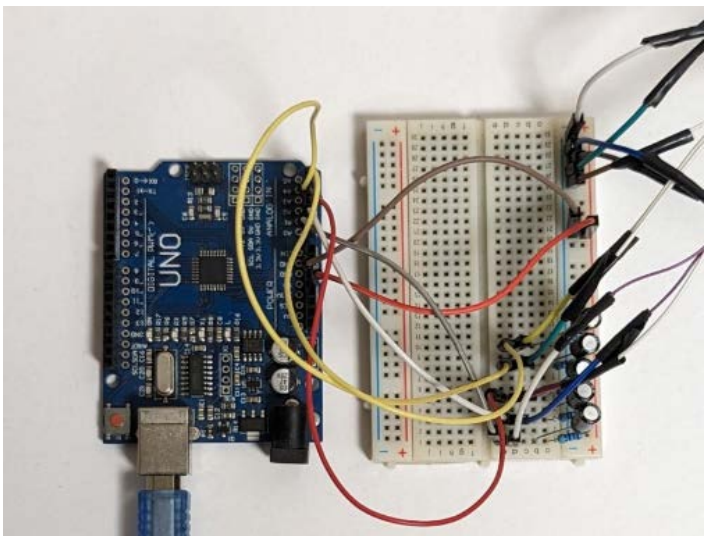


Рис. 16. **Вимірювальна система для визначення температури з п’ятьма вимірювальними датчиками**

Пристрій підключається до комп'ютера через USB, що дозволяє передавати дані для подальшого аналізу. Arduino Uno зчитує сигнали від датчиків температури та перетворює їх з аналогових в цифрові. Дані з Arduino передаються в комп'ютер через USB-порт і зберігаються у файлі для подальшого аналізу. Далі, використовуючи програмне середовище Microsoft Excel та отриманий файл, для візуалізації будуються графіки залежності температури від часу.

Реалізований підхід демонструє використання відкритих технологій та програмного забезпечення для створення корисних інструментів моніторингу в різних додатках, включаючи контроль температури у шнековому екструдері та при 3D-друку.

Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру з фторопласту і флубону наведено на рис. 17–18.

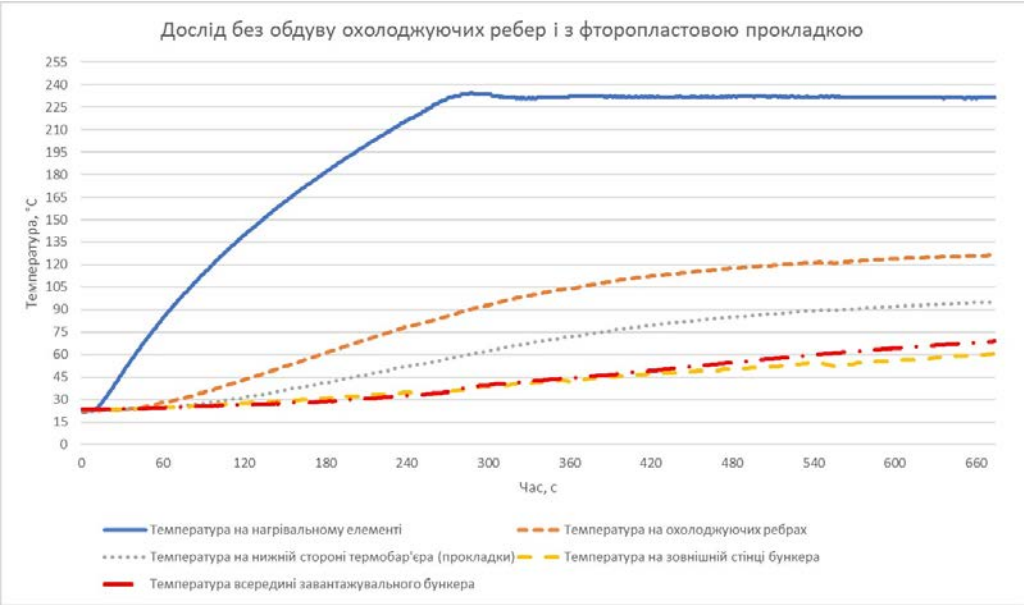


Рис. 17. **Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру (фторопластової прокладки)**

Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та полімеру в завантажувальному бункера і наявністю термобар'єрів з фторопласту та флубону приведено на рис. 19–20.

Візуальне зображення нагрівання, охолодження та екструзії було знято за допомогою тепловізійної камери Walcom HT-03 [28]. Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру (фторопластової та флубонової прокладок), зроблені за допомогою тепловізора приведено на рис. 21 та 22.

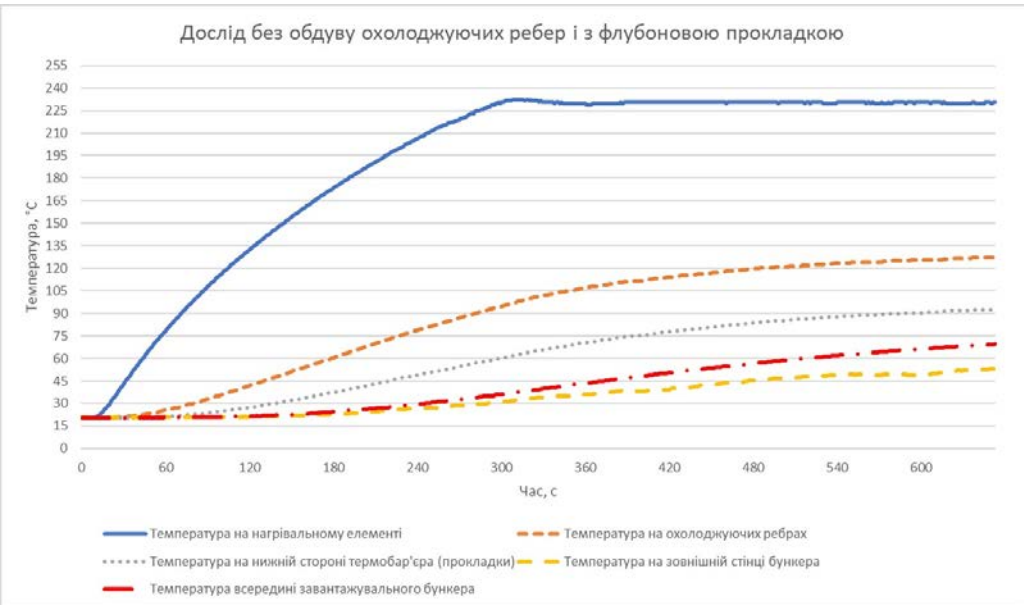


Рис. 18. **Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру (флубонової прокладки)**

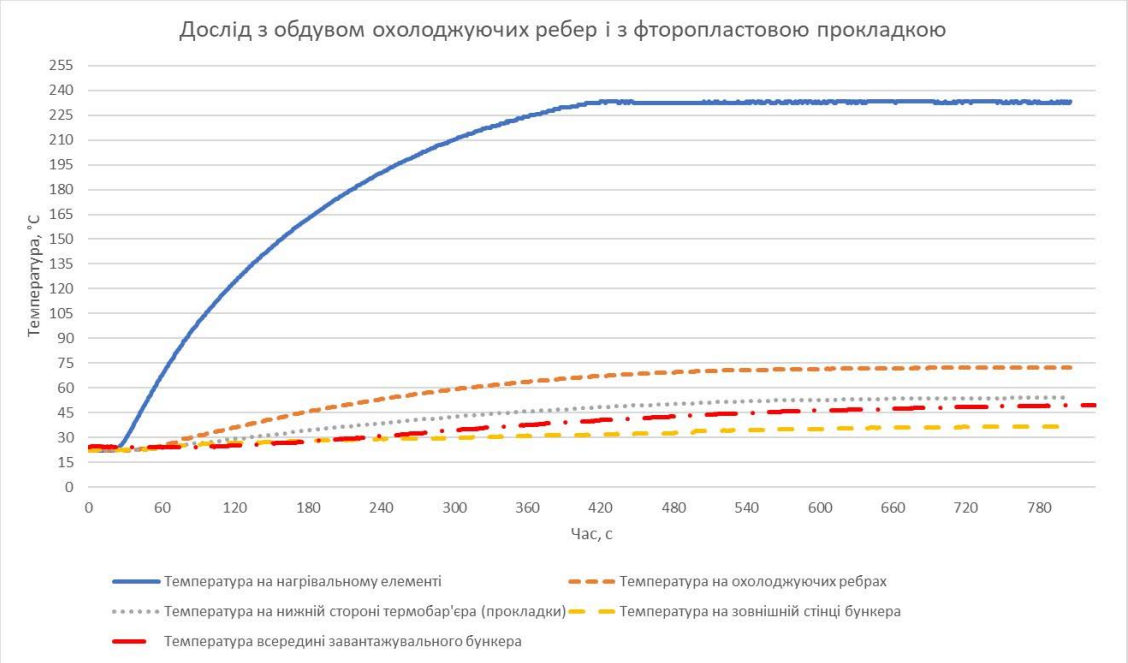


Рис. 19. **Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та обдувом полімеру в завантажувальному бункері і наявністю термобар'єру (фторопластової прокладки)**

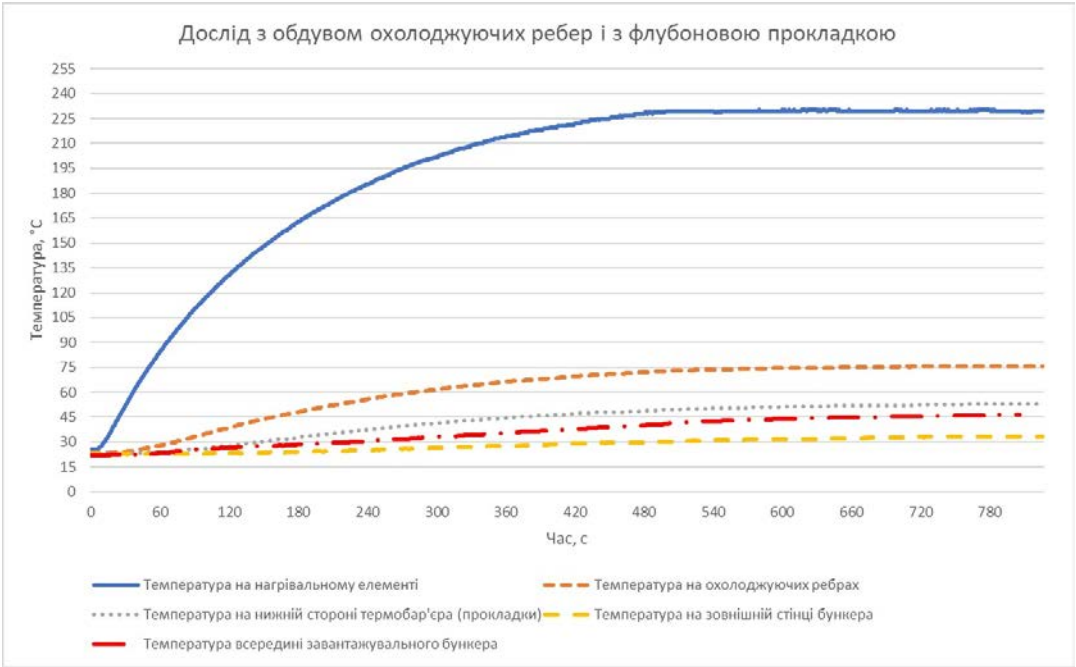
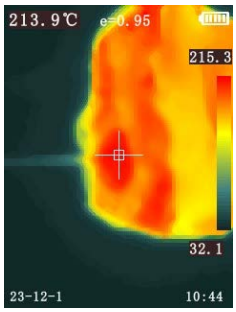
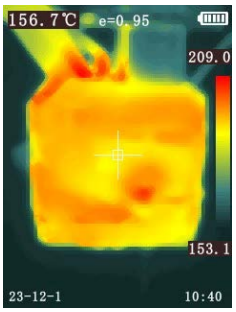


Рис. 20. **Графіки зміни температури від часу в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та обдувом полімеру в завантажувальному бункері і наявністю термобар'єру (флубонової прокладки)**

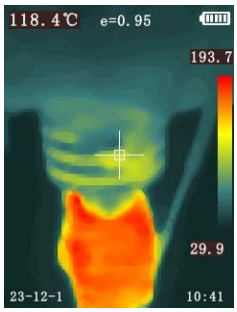
Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та полімеру в завантажувальному бункера і наявністю термобар'єру (фторопластової та флубонової прокладок), зроблені за допомогою тепловізора приведено на рис. 23 та 24.



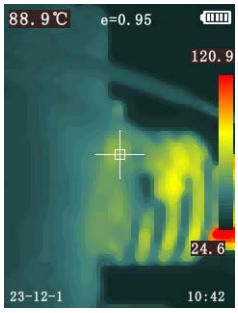
а) на соплі (точка 1)



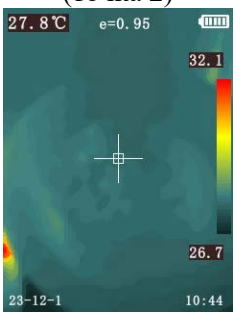
б) на нагрівальному елементі (точка 2)



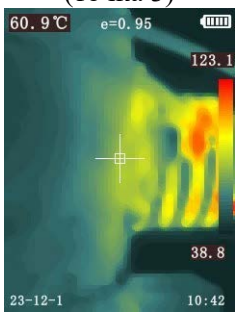
в) на охолоджуючих ребрах (точка 3)



г) на нижній стороні фторопласту прокладки (точка 4)

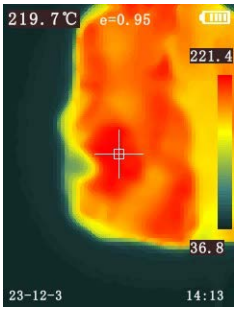


д) всередині завантажувального бункера (точка 5)

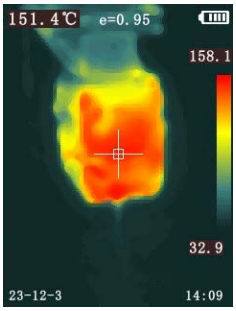


е) на зовнішній стінці бункера вище термопрокладки (точка 6)

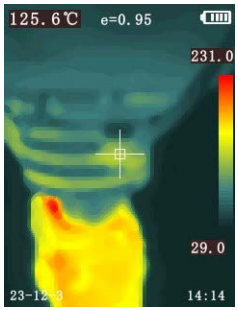
Рис. 21. **Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру з фторопластової прокладки**



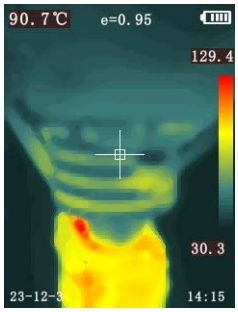
а) на соплі (точка 1)



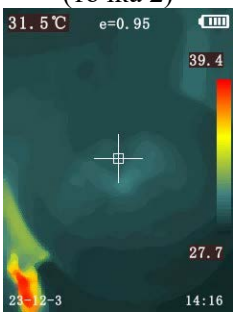
б) на нагрівальному елементі (точка 2)



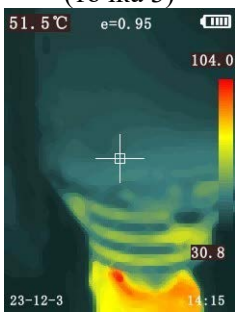
в) на охолоджуючих ребрах (точка 3)



г) на нижній стороні фторопласту прокладки (точка 4)

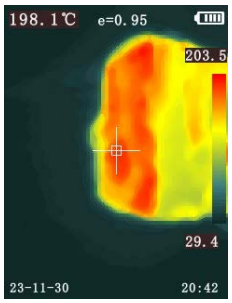


д) всередині завантажувального бункера (точка 5)

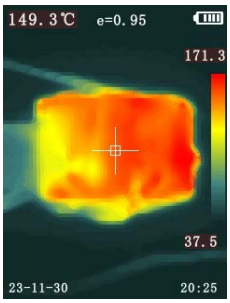


е) на зовнішній стінці бункера вище термопрокладки (точка 6)

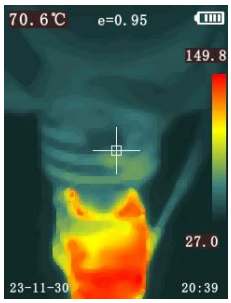
Рис. 22. **Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру з флубонової прокладки**



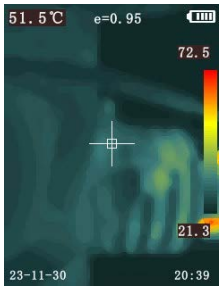
а) на соплі (точка 1)



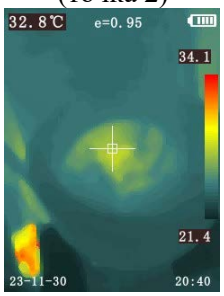
б) на нагрівальному елементі (точка 2)



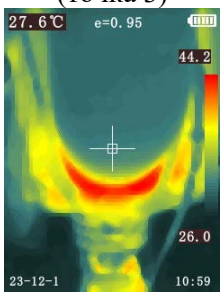
в) на охолоджуючих ребрах (точка 3)



г) на нижній стороні фторопласту прокладки (точка 4)

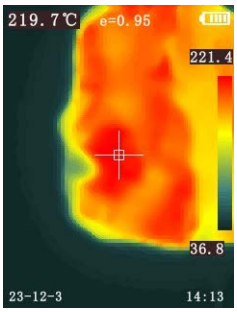


д) всередині завантажувального бункера (точка 5)

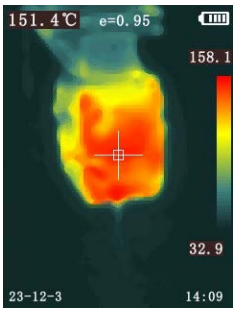


е) на зовнішній стінці бункера вище термопрокладки (точка 6)

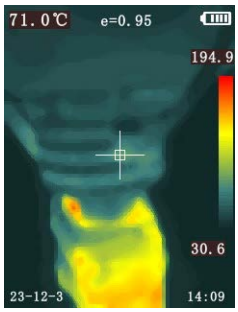
Рис. 23. **Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та полімеру в завантажувальному бункера і наявністю термобар'єру з фторопластової прокладки)**



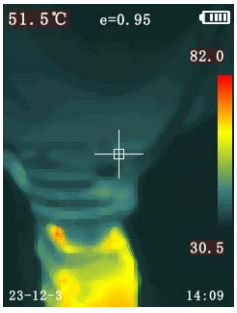
а) на соплі (точка 1)



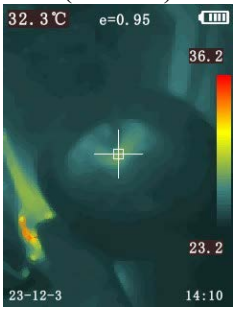
б) на нагрівальному елементі (точка 2)



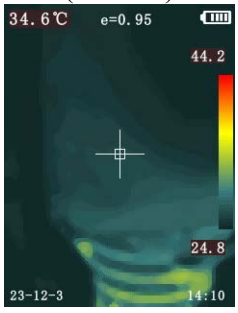
в) на охолоджуючих ребрах (точка 3)



г) на нижній стороні фторопласту прокладки (точка 4)



д) всередині завантажувального бункера (точка 5)



е) на зовнішній стінці бункера вище термопрокладки (точка 6)

Рис. 24. **Знімки розподілу температури в різних місцях шнекового екструдера з обдувом охолоджуючих ребер та полімеру в завантажувальному бункера і наявністю термобар'єру з флубонової прокладки**

Значення температур в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання без обдуву охолоджуючих ребер, але з обдувом полімеру в завантажувальному бункері та наявністю термобар'єру (фторопластової та флубонової прокладок) приведено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Температури в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання без обдуву повітрям охолоджуючих ребер (прокладка фторопласт)

№ п/п	Спосіб визначення температури	Температура, ^{0}C					
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
1	Моделювання в програмному середовищі SolidWorks Simulation	227,47	235,4	124,06	84,7	83,58*	75,6*
2	За допомогою вимірювальної системи	-	232,5	124,3	92,0	68,0	60,0
3	З використанням тепловізійної камери	213,9	156,7**	118,4	88,9	27,8***	60,9

* *значення температури розраховані без наявності теплового бар'єру (прокладки).*
** *значення температури визначене на поверхні теплоізоляції нагрівального елементу.*
*** *значення температури визначене з похибкою через наявність полімеру в бункері.*

Таблиця 2

Температури в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання без обдуву повітрям охолоджуючих ребер (прокладка флубон)

№ п/п	Спосіб визначення температури	Температура, ^{0}C					
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
1	Моделювання в програмному середовищі SolidWorks Simulation	227,5	235,23	123,8	84,0	-	-
2	За допомогою вимірювальної системи	-	231	126,5	92	69	52
3	З використанням тепловізійної камери	219,7	151,4**	125,6	90,7	31,5***	51,5

** *значення температури визначене на поверхні теплоізоляції нагрівального елементу.*
*** *значення температури визначене з похибкою через наявність полімеру в бункері.*

Похибка між теоретичними (рис. 9–13) та експериментальними (рис. 17–24) значеннями температур в різних місцях шнекового екструдера при використанні розробленої системи охолодження визначалася за формулою [34]:

$$\varepsilon = \frac{\pm(x_{вим.} - x_д)}{x_д} \cdot 100\% = \frac{\pm\Delta_x}{x_д} \cdot 100\% \qquad (1)$$

де $x_д$ – дійсне значення виміряної величини;

$x_{вим.}$ – виміряне значення величини;

Δ_x – відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини.

Таблиця 3

Температури в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання з обдувом охолоджуючих ребер і полімеру в завантажувальному бункері та наявністю фторопластової прокладки

№ п/п	Спосіб визначення температури	Температура, ^{0}C					
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
1	Моделювання в програмному середовищі SolidWorks Simulation	217,71	209,19	82,06	53,2	40,65	38,29
2	За допомогою вимірювальної системи	-	232,5	73,5	53,1	48,1	35
3	З використанням тепловізійної камери	198,1	149,3**	70,6	51,5	32,8***	34,6

** *значення температури визначене на поверхні теплоізоляції нагрівального елементу.*
*** *значення температури визначене з похибкою через наявність полімеру в бункері.*

Таблиця 4

Температури в місцях вимірювання при моделюванні в програмному середовищі SolidWorks Simulation та при двох способах вимірювання з обдувом охолоджуючих ребер і полімеру в завантажувальному бункері та наявністю флубонової прокладки

№ п/п	Спосіб визначення температури	Температура, ^{0}C					
		Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5	Точка 6
1	Моделювання в програмному середовищі SolidWorks Simulation	222,41	216,33	84,76	56,16	40,86	40,05
2	За допомогою вимірювальної системи	-	230,5	75,1	52,5	45	33,2
3	З використанням тепловізійної камери	219,7	151,4**	71,0	51,5	32,3***	34,6

** *значення температури визначене на поверхні теплоізоляції нагрівального елементу.*
*** *значення температури визначене з похибкою через наявність полімеру в бункері.*

За дійсне значення виміряної величини приймалися покази розробленої системи вимірювання на базі терморезисторів NTC 3950, які пройшли повірку та мають похибку вимірювання в межах ±1 °C.

Найбільша похибка при розрахунку за формулою (1) теоретичних та експериментальних значень температур в різних місцях шнекового екструдера (табл. 1, 2) без обдуву повітрям охолоджуючих ребер склала 27,5%. Таку велику похибку можна пояснити тим, що датчик температури не щільно прилягав до внутрішньої стінки завантажувального бункера. Це відобразилося на показах вимірювального приладу.

Найбільша похибка при розрахунку за формулою (1) теоретичних та експериментальних значень температур в різних місцях шнекового екструдера (табл. 1, 2) із використанням розробленої системи охолодження становила 9,6%, що знаходиться в межах допустимого. Це свідчить про високу точність та надійність вимірювань, що є критично важливим для забезпечення контролю якості процесу 3D-друку. Така висока точність дозволяє оптимізувати параметри нагрівання, забезпечуючи оптимальні умови для плавлення полімеру, та мінімізувати ризик дефектів в друкованих виробах. Результати також підкреслюють ефективність використання поєднання різних типів вимірювальних інструментів для отримання точних даних, які можуть бути використані для подальшого вдосконалення конструкції та процесів роботи екструдера.

Висновки. Проведені теоретичні дослідження розробленої системи охолодження шнекового екструдера, виконані за допомогою SolidWorks Simulation, дали змогу та підтвердили ефективність цього підходу. Моделювання в SolidWorks Simulation дозволило детально проаналізувати тепловий режим в різних частинах екструдера, виявляючи найбільш нагріті зони та оцінюючи ефективність різних елементів системи охолодження. Результати показали, що інтегрований підхід до охолодження забезпечує значне зниження температури в критичних зонах, запобігаючи перегріву та покращуючи загальну надійність та продуктивність екструдера. Таким чином, теоретичні дослідження підтвердили, що використання комплексної системи охолодження є ключовим для оптимізації роботи шнекового екструдера в 3D-друку.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили теоретичні розрахунки та показали, що найефективнішою системою охолодження шнекового екструдера є система з використанням охолоджуючих ребер на матеріальному циліндрі та їх обдуву потоком повітря від вентилятора, а також додаткового обдуву полімеру в завантажувальному бункері потоком повітря від вентилятора та наявності теплового бар'єру у вигляді прокладки з флубону між матеріальним циліндром та бункером. Це забезпечує більш ефективне відведення тепла від критичних елементів екструдера, знижуючи ризик перегріву та забезпечуючи стабільніші умови для процесу екструзії. Така інтегрована система охолодження показує значно кращі результати порівняно з окремим використанням охолоджуючих ребер або лише їх обдуву вентилятором, вказуючи на важливість комплексного підходу до управління температурою в обладнанні для 3D-друку.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що серед трьох матеріалів силікон, фторопласт 4 і флубон 15 найнижчу теплопровідність має флубон 15. Тому його можна рекомендувати для виготовлення теплового бар’єру у вигляді прокладки між матеріальним циліндром і завантажувальним бункером шнекового екструдера.

В цілому, дана розробка є значним досягненням, що сприяє розвитку адитивних технологій та удосконаленню шнекового екструдера 3D-принтера, забезпечуючи високу ефективність, економічність та екологічну сталість при 3D-друку.

References

1. Teploprovidnist metaliv: kharakterystyky, metody vyvchennia [Thermal conductivity of metals: characteristics, methods of study]. URL: https://interexpo.com.ua/rus/articles/cat_505-ff_0-items_2000-mode_full.html [in Ukrainian].
2. Mikulonok, I. O., Sokolskyi, O. L., Sivetskyi, V. I., Radchenko, L. B. (2015). Osnovy proektuvannia odnocherv’iachnykh ekstruderiv: navch. posib. [Basics of designing single-worm extruders: training. manual]. Kyiv: NTUU "KPI". 200 p. [in Ukrainian].
3. Sizov, V. D., Sorokvashin, S. V. (2018). Osnovy 3D-druku [Basics of 3D printing]. URL: https://cpto.dp.ua/public_html/posibnyky/osnovy_3d.pdf [in Ukrainian].
4. Manzhilevskyi, O. D., Iskovich-Lototskyi, R. D. (2021). Suchasni adytyvni tekhnolohii 3D druku. Osoblyvosti praktychnoho zastosuvannia [Modern additive technologies of 3D printing. Features of practical application: study guide]. Vinnytsia: VNTU, 2021. 105 p. [in Ukrainian].
5. Turner, B. N., Strong, R., Gold, S. A. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I.

Література

1. Теплопровідність металів: характеристики, методи вивчення. URL: https://interexpo.com.ua/rus/articles/cat_505-ff_0-items_2000-mode_full.html.
2. Мікульонок І. О., Сокольський О. Л., Сівецький В. І., Радченко Л. Б. Основи проектування одночерв’ячних екструдерів: навч. посіб. К.: НТУУ "КПІ", 2015. 200 с.
3. Сізов В. Д., Сороквашин С. В. Основи 3D-друку. 2018. URL: https://cpto.dp.ua/public_html/posibnyky/osnovy_3d.pdf.
4. Манжілевський О. Д., Іскович-Лотоцький Р. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2021. 105 с.
5. Turner B. N., Strong R., Gold S. A. A review of melt extrusion additive manufacturing

Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3), P. 192–204, https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012.

6. Sukindar, N. A., Ariffin, M. K. A., Baharudin, B. T. H. T., Jaafar, C. N. A., Ismail, M. I. S. (2016). Analyzing the Effect of Nozzle Diameter in Fused Deposition Modeling for Extruding Polylactic Acid Using Open Source 3D Printing. *Jurnal Teknologi*, 78(10), P. 7–15.

7. Papon, E. A., Sharif, M. A. R., Haque, A. (2017). Effect of Nozzle Geometry on Melt Flow Simulation and Structural Property of Thermoplastic Nanocomposites in Fused Deposition Modeling. Conference Paper. *Thirty-second Technical Conference*, West Lafayette, IN, USA, Oct. 23, 2017, https://doi.org/10.12783/asc2017/15339.

8. Gutiérrez Arias, G., Jiménez Díaz, F., Rúa Ramirez, E., Valcarcel Guzman, J. (2021). Thermal Analysis by Finite Elements of Hotends for 3D Printing by Fused Filament Fabrication. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 65(2), P. 129–133. https://doi.org/10.3311/PPme.16203.

9. Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodriguez, J. A., Gomez-Gras, G., Freixedes, J. (2015). Design of Open Source 3D Printer Extruder and Modelling of Thermal Performance with FEA. *The 19th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"* (TMT), Barcelona, Spain, Jul. 22-23, 2015.

10. Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodriguez, J. A., Corbella, X., Busqué, R., Gomez-Gras, G. (20116). Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier. *Mechatronics*, 36, P. 119–126.

11. Günel, O., Koc, E., Tiryaki, G. (2017). Investigation of Heat Sink Geometry Effect on Cooling Performance for a FDM 3D Printer Liquefier. *The International Conference on Energy and Thermal Engineering*, Istanbul, Turkey, 2017, pp. 569–573.

12. Günel, O., Koc, E., Yavuz, T. (2017). Investigation of Thermal Effect on 3D Printer Liquefier of different Cooling Fan Nozzle Geometry. *International Conference on Energy and Thermal Engineering*, Istanbul, Turkey, 2017, pp. 418–422.

13. Polishchuk, A. O. (2023). Rozrobka konstruktsii shnekovoho ekstrudera 3D-pryntera, shcho vykorystovuie

processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*. 2014. 20(3). P. 192–204. https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0012.

6. Sukindar N. A., Ariffin M. K. A., Baharudin B. T. H. T., Jaafar C. N. A., Ismail M. I. S. Analyzing the Effect of Nozzle Diameter in Fused Deposition Modeling for Extruding Polylactic Acid Using Open Source 3D Printing. *Jurnal Teknologi*. 2016. 78(10). P. 7–15.

7. Papon E. A., Sharif M. A. R., Haque A. Effect of Nozzle Geometry on Melt Flow Simulation and Structural Property of Thermoplastic Nanocomposites in Fused Deposition Modeling. Conference Paper. *Thirty-second Technical Conference*. West Lafayette, IN, USA, Oct. 23, 2017. https://doi.org/10.12783/asc2017/15339.

8. Gutiérrez Arias G., Jiménez Díaz F., Rúa Ramirez E., Valcarcel Guzman J. Thermal Analysis by Finite Elements of Hotends for 3D Printing by Fused Filament Fabrication. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2021. 65(2). P. 129–133. https://doi.org/10.3311/PPme.16203.

9. Jerez-Mesa R., Travieso-Rodriguez J. A., Gomez-Gras G., Freixedes. J. Design of Open Source 3D Printer Extruder and Modelling of Thermal Performance with FEA. *The 19th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"* (TMT). Barcelona, Spain, Jul. 22-23, 2015.

10. Jerez-Mesa R., Travieso-Rodriguez J. A., Corbella X., Busqué R., Gomez-Gras G. Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier. *Mechatronics*. 2016. 36. P. 119–126.

11. Günel O., Koc E., Tiryaki G. Investigation of Heat Sink Geometry Effect on Cooling Performance for a FDM 3D Printer Liquefier. *The International Conference on Energy and Thermal Engineering*. Istanbul, Turkey, 2017. P. 569–573.

12. Günel O., Koc E., Yavuz T. Investigation of Thermal Effect on 3D Printer Liquefier of different Cooling Fan Nozzle Geometry. *International Conference on Energy and Thermal Engineering*. Istanbul, Turkey, 2017. P. 418–422.

13. Поліщук А. О. Розробка конструкції шнекового екструдера 3D-принтера, що

hranuly abo podribneni chastky polimeru v yakosti vykhidnoi syrovyny [Development of a screw extruder design for a 3D printer that uses granules or crushed polymer particles as raw materials]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh = Technologies and engineering*, No. 5 [in Ukrainian].

14. Polishchuk, O. S., Zozulya, P. F., Polishchuk, A. O. (2017). Uzahalnena klasyfikatsiia filamentiv dlia 3D-druku [Generalized classification of filaments for 3D printing]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu = Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, No. 6, P. 51–59 [in Ukrainian].

15. Sylikonova huma 2mm [Silicone rubber 2 mm]. URL: http://surl.li/nooth [in Ukrainian].

16. Prozoryi sylikonovyi humovyi lyst [Transparent silicone rubber sheet]. URL: http://surl.li/nootv [in Ukrainian].

17. Extrusion System. URL: https://jetclay.com/project/open-source-clay-extrusion-system.

18. Jo, J. H., Jo, B. W., Cho, W., Kim, J.-H. (2020). Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2020. March. DOI: 10.1186/s40069-019-0388-2.

19. Lin, T., Zhao, Z., Wang, T., Pan, Ye-T. (2023). Three-Dimensional Printing of Large Ceramic Products and Process Simulation. *Materials*. 2023. № 16. https://doi.org/10.3390/ma16103815.

20. Kurska, T. M., Chernobay, G. O., Eremenko, S. B. (2008). Materialoznavstvo ta tekhnolohiia materialiv: konspekt lektsii [Materials science and materials technology: synopsis of lectures]. Kharkiv: UCZU. 136 p. [in Ukrainian].

21. Fizychni vlastyvosti i tekhnichni kharakterystyky ftoroplasta [Physical properties and technical characteristics of fluoroplastic]. URL: http://kaprolon.com.ua/svojstva-i-harakteristiki-ftoroplasta/ [in Ukrainian].

22. Properties and types of Fluoroplastics (Teflon). Basic information about fluoroplastics URL: https://baltro.cz/en/properties-and-types-of-fluoroplastics-teflon/.

23. Ftoroplast-4 (PTFE) [Fluoroplast-4 (PTFE)]. URL: https://santex-kiev.com.ua/products/ftoroplast.

24. Polishchuk, A., Polishchuk, O., Lisevich, S., Urbanyuk, E., Rubanka, M. (2023). Kompozytsiini sumishi na osnovi syntetychnykh polimeriv i napovniuvachiv ta obladnannia dlia 3D-druku nymy [Composite mixtures based on synthetic polymers and fillers and equipment for 3D printing with them]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho*

використовує гранули або подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини. *Технології та інжиніринг*. 2023. № 5.

14. Поліщук О. С., Зозуля П. Ф., Поліщук А. О. Узагальнена класифікація філаментів для 3D-друку. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2017. № 6. С. 51–59.

15. Силіконова гума 2мм. URL: http://surl.li/nooth.

16. Прозорий силіконовий гумовий лист. URL: http://surl.li/nootv.

17. Extrusion System. URL: https://jetclay.com/project/open-source-clay-extrusion-system.

18. Jo J. H., Jo B. W., Cho W., Kim J.-H. Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2020. March. DOI: 10.1186/s40069-019-0388-2.

19. Lin T., Zhao Z., Wang T., Pan Ye-T. Three-Dimensional Printing of Large Ceramic Products and Process Simulation. *Materials*. 2023. № 16. https://doi.org/10.3390/ma16103815.

20. Курська Т. М., Чернобай Г. О., Єрьоменко С. Б. Матеріалознавство та технологія матеріалів: конспект лекцій. Х.: УЦЗУ, 2008. 136 с.

21. Фізичні властивості і технічні характеристики фторопласта. URL: http://kaprolon.com.ua/svojstva-i-harakteristiki-ftoroplasta/.

22. Properties and types of Fluoroplastics (Teflon). Basic information about fluoroplastics. URL: https://baltro.cz/en/properties-and-types-of-fluoroplastics-teflon/.

23. Фторопласт-4 (PTFE). URL: https://santex-kiev.com.ua/products/ftoroplast.

24. Поліщук А., Поліщук О., Лісевич С., Урбанюк Є., Рубанка М. Композиційні суміші на основі синтетичних полімерів і наповнювачів та обладнання для 3D-друку ними. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2023. Ч. 1. № 2. С. 104–110.

universytetu = Bulletin of the Khmelnytskyi National University, Part 1, No. 2, P. 104–110 [in Ukrainian].
25. Kompozytni materialy [Composite materials]. URL: http://rts-ua.com/kompozitnye-materialy/.
26. Flubon. URL: https://nauka.khmnu.edu.ua/flubon/ [in Ukrainian].
27. Anycubic 4 Max Pro 2.0 3D printer. URL: http://surl.li/nvpgk [in Ukrainian].
28. Teplovizor dlia enerhoaudytu [Thermal imager for energy audit (80x60) WALCOM HT-03]. https://simvolt.ua/teplovizor-dlya-energoauditu-80x60-walcom-ht-03/ [in Ukrainian].
29. SolidWorks Simulation URL: https://www.solidworks.com/product/solidworks-simulation.
30. Shcho take fum-strichka i dlia choho vona vykorystovuietsia? [What is fum tape and what is it used for?]. URL: https://pkf-elektroplast.com.ua/ua/a399204-chto-takoe-fum.html [in Ukrainian].
31. Kaptonovyi skotch [Kapton adhesive tape]. URL: https://akum.in.ua/ua/kaptonovyj-skotch-08h30-mm-33-m/ [in Ukrainian].
32. Termorezystor NTC 3950 100kOm iz provodom [Thermistor NTC 3950 100 kΩ with conductor]. URL: https://www.mini-tech.com.ua/ua/termorezistor-ntc-3950-100-kom-s-kabelem [in Ukrainian].
33. Arduino UNO R3 URL: https://arduino.ua/prod2610-arduino-uno-r3-ch340.
34. Suslikov, L. M., Studenyak, I. P. (2014). Metrolohiia ta vymiriuvannia: navchalnyi posibnyk [Metrology and measurement: study guide]. Uzhhorod: UzhNU Publishing House. 292 p. [in Ukrainian].

25. Композитні матеріали. URL: http://rts-ua.com/kompozitnye-materialy/.
26. Флубон. URL: https://nauka.khmnu.edu.ua/flubon/.
27. Anycubic 4 Max Pro 2.0 3D принтер. URL: http://surl.li/nvpgk.
28. Тепловізор для енергоаудиту (80x60) WALCOM HT-03. URL: https://simvolt.ua/teplovizor-dlya-energoauditu-80x60-walcom-ht-03/.
29. SolidWorks Simulation. URL: https://www.solidworks.com/product/solidworks-simulation.
30. Що таке фум-стрічка і для чого вона використовується? URL: https://pkf-elektroplast.com.ua/ua/a399204-chto-takoe-fum.html.
31. Каптоновий скотч. URL: https://akum.in.ua/ua/kaptonovyj-skotch-08h30-mm-33-m/.
32. Терморезистор NTC 3950 100кОм із проводом. URL: https://www.mini-tech.com.ua/ua/termorezistor-ntc-3950-100-kom-s-kabelem.
33. Arduino UNO R3. URL: https://arduino.ua/prod2610-arduino-uno-r3-ch340.
34. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Метрологія та вимірювання: навчальний посібник. Ужгород: Видавництво УжНУ, 2014. 292 с.

POLISHCHUK ANDRII
Postgraduate student,
Department of machines and apparatuses,
electromechanical and energy systems,
Khmelnytskyi National University, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-7887-7169
Scopus Author ID: 57221085232
E-mail: andrepol215@gmail.com

POLISHCHUK A. O.
Khmelnytskyi National University, Ukraine

DEVELOPMENT OF THE COOLING SYSTEM OF THE SCREW EXTRUDER BODY OF THE 3D PRINTER

Purpose. *The development of a cooling system for the 3D-printer screw extruder housing, which is aimed at reducing the overheating of the polymer material during extrusion and increasing the accuracy and quality of printing finished parts.*

Methodology. *A complex of theoretical, empirical, and statistical methods was used in the work to implement the proposed tasks and test the formulated hypotheses. Theoretical and experimental studies were based on fundamental knowledge in the field of mechanical engineering, heat engineering, and also took into account the features and requirements related to polymer processing. Mathematical processing of the research results was carried out using MS Excel software.*

Findings. *A cooling system for the body of a 3D printer screw extruder has been developed using a material cylinder with fins for heat dissipation, two fans and a thermal barrier. Heat-insulating pads (barriers) for the extruder of a 3D printer made of silicone, Teflon (fluoroplastic 4) and flubon. Their thermal conductivity was studied. With the use of SolidWorks Simulation, a static and transient thermal analysis of the cooling system of the screw extruder body of the 3D printer was performed. A measuring system was developed for setting the temperature of the screw extruder at five points. Experimental studies were conducted to determine the temperature on the nozzle; on the heating element; on the cooling fins of the material cylinder, under the heat-insulating gasket, inside the loading hopper and on its body. Graphs of temperature changes over time in different places of the screw extruder when using different elements of the cooling system are plotted. A comparison of screw extruder temperatures determined theoretically using SolidWorks Simulation and experimentally using a measuring system and a thermal imaging camera was made.*

Originality. *Rational relations between the elements of the cooling system of the screw extruder body of the 3D printer have been established, which make it possible to prevent overheating of the extruder and improve the quality of the extrusion process and the production of finished products.*

Practical value. *A cooling system for the screw extruder body of the 3D printer has been developed, which will significantly increase the efficiency and reliability of the 3D printing process. Such a system will also contribute to increasing the durability of equipment, reducing production costs by preventing defects in 3D printing products associated with temperature fluctuations, and improving their quality. In addition, effective cooling will enable the use of a wider range of polymer materials, including those with higher temperature requirements, thereby expanding the capabilities of 3D printing and providing greater flexibility in manufacturing.*

Keywords*: 3D printer; 3D printing; screw extruder; cooling system; thermal barrier; thermal insulation pad; SolidWorks Simulation; temperature sensor; thermal imaging camera.*

ISSN 2786-5371 print
ISSN 2786-538X online
Технології та інжиніринг, № 6(17), 2023

https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.6

УДК 621.31: 535.215

ШАВЬОЛКІН О. О., МАРЧЕНКО Р. М.
Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІКИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ТА УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНОЮ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ СИСТЕМОЮ З АКУМУЛЯТОРОМ ДЛЯ САМОСПОЖИВАННЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ

Мета. *Підвищення ступеня використання енергії гібридної фотоелектричної системи з акумулятором для самоспоживання локального об'єкту з урахуванням відхилень графіка навантаження від розрахункового та генерації енергії від прогнозу при зниженні споживання електроенергії з мережі.*

Методика. *Аналітичні методи розрахунку в електричних ланцюгах та результати обробки архівних даних генерації фотоелектричної батареї для заданої точки знаходження об'єкта з використанням комп'ютерного моделювання для оцінювання результатів.*

Результати. *Уточнена техніка вибору параметрів фотоелектричної системи за архівними даними генерації за 5 років, що дозволяє підвищити достовірність оцінки очікуваних значень ступеня зниження споживаної електроенергії.*

Наукова новизна. *Набув розвитку принцип управління із завданням активної потужності за прогнозом генерації фотоелектричної батареї для прийнятого графіка навантаження з корекцією в процесі формування графіка стану заряду акумулятора SoC(t). Це забезпечує можливість компенсації відхилень графіка навантаження від розрахункового та генерації фотоелектричної батареї відносно прогнозного значення до 20% при зниженні споживання електроенергії та підвищенні ступеня використання енергії фотоелектричної батареї. Здійснюється за заданого обмеження глибини розряду акумулятора. Відповідність графіка SoC(t) досягається корекцією споживання активної потужності за відхиленням SoC із заданою дискретністю часу. За цим запропоновано варіант формування графіка SoC(t), що забезпечує можливість корекції за малої генерації фотоелектричної батареї з вирівнюванням споживанням потужності.*

Практичне значення. *Отримані рішення щодо формування графіка SoC(t) можуть бути використані при проектуванні фотоелектричних систем для забезпечення власних потреб локальних об'єктів.*

Ключові слова*: гібридна фотоелектрична система; техніка визначення параметрів; завдання активної потужності; графік стану заряду акумуляторної батареї; корекція за відхиленням; моделювання у добовому режимі.*

Вступ. Застосування гібридних фотоелектричних систем (ФЕС) із підключенням до мережі для самоспоживання локальних об'єктів (ЛО) побутового та агропромислового сектора відносно невеликої потужності зараз є загальноприйнятою практикою. Найчастіше вирішується завдання забезпечення потреб. В якості накопичувача та для перерозподілу електроенергії в системі, зазвичай використовується акумуляторна батарея (АКБ). Окупність таких систем визначається ступенем використання енергії фотоелектричної батареї (ФБ) на самоспоживання [1]. При цьому актуальним є завдання підвищення ступеня використання встановленої потужності ФБ із зниженням споживаної з мережі електроенергії, що досягається коректним визначенням параметрів системи при вдосконаленні управління.

Аналіз попередніх досліджень. Питанням оптимізації вибору параметрів та управління ФЕС приділяється велика увага, про що свідчать матеріали оглядових робіт [2, 3]. Проектування систем з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) засноване на обліку енергетичного потенціалу фотоелектричної батареї (ФБ) для конкретної локації ЛО [4, 5]. Для систем із генерацією надлишків електроенергії в мережу, коли має місце повне використання енергії ВДЕ, прийнятою практикою є використання при розрахунках середніх за місяць

значень генерації ВДЕ. Такі дані для локації ФЕС можна отримати з використанням європейської геосистеми [6]. У разі ФЕС для самоспоживання ЛО без генерації в мережу має місце неповне використання енергії ФБ з переходом з режиму максимальної потужності MPPT в режим регулювання генерації ФБ [7]. Регулювання генерації ФБ передбачають і гібридні інвертори [8]. У цьому випадку оцінка за середніми значеннями не є об'єктивною. В роботі [9] для забезпечення ефективного використання енергії також враховуються середній за місяць розподіл генерації ФБ протягом дня та для аналізу підбираються дні з відповідним розподілом

В роботі [10] у методиці розрахунку параметрів гібридної ФЕС використано спрощену модель енергетичних процесів у добовому циклі з урахування розподілу генерації ФБ по днях за 5 років. Розрахунок ведеться виходячи з архівних даних генерації ФБ за інтервалами часу відповідно до графіка навантаження ЛО при використанні ФЕС на самоспоживання без генерації надлишків енергії в мережу. При цьому введено граничне значення енергії ФБ W_{PVB}, яке може бути використане на споживання ЛО. Результатом є середнє значення ступеня зниження споживання з мережі за місяцями та ступенем використання енергії ФБ для літнього місяця. Відсутня інтегральна оцінка протягом року. У моделі не враховується енергоємність АКБ та можливе неповне використання енергії ФБ на інтервалі часу після повного заряду АКБ.

Взаємодія ФЕС із мережею також передбачає вирішення питань електромагнітної сумісності з використанням багатофункціональних мережевих інверторів [11, 12]. Окрім забезпечення близького до 1 коефіцієнта потужності в точці підключення до мережі, з'являються додаткові можливості, зокрема регулювання активної потужності, споживаної з мережі [13]. Для багатофункціонального інвертора використовується система регулювання з кількома каналами [13, 7]. Це канали керування струмами АКБ, ФБ та струмом у точці підключення до мережі. Залежно від режиму функціонування використовується один канал, що забезпечує стабілізацію напруги у ланці постійного струму (DC). В роботі [13] за наявності кількох каналів управління забезпечення балансу потужності у системі використовується пропорційно-інтегральний регулятор у DC ланці.

Управління розподілом енергії в системах з ВДЕ зазвичай здійснюється у функції поточних значень потужностей, що генеруються ВДЕ, та навантаженням P_L. Їх співвідношення визначає режим заряду або розряду АКБ, споживання з мережі відповідно до прийнятого алгоритму [14]. Потужність, що споживається з мережі P_g, при цьому змінюється в широких межах від 0 до P_L. В роботах [10, 15] розглянуто використання управління із завданням активної потужності, що споживається ЛО з мережі, що сприяє вирівнюванню споживання енергії з мережі в часі з можливістю обмеження споживання в пікові години. Ефективність використання енергії ВДЕ та енергоємність АКБ на споживання визначається алгоритмом управління перерозподілом енергії в системі, що ґрунтується на використанні короткострокового прогнозу генерації ВДЕ. Для отримання достовірного прогнозу генерації ВДЕ використовуються нейромережі [16]. У той же час існує ряд спеціальних веб-ресурсів, які надають інформацію щодо потужності генерації ФБ з урахуванням її орієнтації на поверхні та точки розміщення. Так ресурс [17] надає дані з дискретністю 1 годину. Менша дискретність прогнозу в [18].

Використання прогнозу генерації ФБ у низці робіт [15, 19] прив'язують до формування графіка стану заряду АКБ (SoC(t)). Це дозволяє обмежити глибину розряду АКБ (DOD) і забезпечує зниження (виключення) споживання енергії з мережі. В роботі [15] задаються контрольні значення SoC у відповідні моменти часу. В роботі [19] стосовно гібридної ФЕС з вітрогенератором розглянуто формування розрахункового графіка SoC(t) з корекцією значення активної потужності щодо відхилення фактичного значення SoC від розрахункового значення. Переслідується мета забезпечити функціонування системи при відхиленні графіка навантаження від розрахункового та генерації ФБ щодо прогнозу. Результатом є підвищення

ступеня використання енергії ВДЕ та зниження споживання з мережі. Проте розглянуто використання корекції лише при відхиленні генерації ФБ на 10%. Водночас похибка прогнозу [20] може досягати до 20%. Це передбачає додаткове вивчення питання корекції.

На стадії проектування та розробки системи зазвичай використовується математичне моделювання. Для цього найчастіше застосовується програмний пакет Matlab. Для систем з ВДЕ широко представлені моделі у добовому циклі (24 h) [21, 22]. Модель енергетичних процесів у добовому циклі для ФЕС з АКБ, що використовуються для самоспоживання ЛО, представлена в [15]. Розглядається керування з регулюванням активної потужності, що споживається з мережі, та з оцінкою показників. Передбачено реалізацію управління за різними сценаріями з розрахунком параметрів управління. При відповідному доопрацюванні можливості моделі можуть бути розширені, зокрема з використанням корекції завдання потужності.

Постановка завдання. Врахування використання енергоємності АКБ та неповного використання енергії ФБ при повному заряді АКБ підвищує достовірність оцінки зниження витрат на електроенергію. При цьому важливо отримати інтегральні показники оцінки за рік. Питання щодо повного використання енергоємності АКБ, обмеження DOD, зниження пікового попиту пов'язані з формуванням графіка SoC(t). При цьому недостатньо вивчено питання формування графіка SoC при реальних відхиленнях графіка навантаження щодо розрахункового та генерації ФБ щодо прогнозу, а також за різних графіків навантаження. Вирішення питання можливе при корекції завдання потужності споживаної з мережі, що дозволить підвищити рівень використання енергії ФБ на споживання при зниженні споживання електроенергії з мережі.

Мета роботи – підвищення ступеня використання енергії ФБ у гібридній ФЕС з АКБ для самоспоживання ЛО з урахуванням відхилень графіка навантаження від розрахункового та генерації енергії від прогнозу при зниженні споживання електроенергії з мережі.

Завдання для вирішення:

- доопрацювати техніку розрахунку параметрів ФЕС для власного споживання об'єкта з уточненням математичної моделі для оцінки значень ступеню зниження витрат та використання енергії ФБ за архівними даними генерації ФБ за кілька років з отриманням очікуваних показників за рік;
- вивчити можливість компенсації відхилень графіка навантаження $P_L(t)$ від розрахункового $P_{LC}(t)$ і фактичної генерації ФБ $P_{PV}(t)$ від прогнозу $P_{PVF}(t)$ при управлінні з завданням значення споживаної потужності $P_{gR}(t)$ при можливому збільшенні відхилення $P_{PV}(t)$ більше 10%;
- доопрацювати та уточнити добову «24h» модель енергетичних процесів у системі з урахуванням особливостей управління та дослідити можливості використання при різних графіках навантаження $P_{LC}(t)$ та значеннях відхилень фактичних та розрахункових значень $P_L(t)$ і $P_{PV}(t)$.

Основні матеріали роботи. Розглянуто варіант гібридної ФЕС з АКБ, структура якої виконана за відомими принципами з використанням багатофункціонального мережевого інвертора [10]. Це стосується і базових принципів побудови системи управління та регулювання із стабілізацією напруги у ланці постійного струму. Скористаємося матеріалами роботи [10] щодо прийнятого графіка навантаження та даних щодо генерації ФБ із встановленою потужністю $P_{PVR} = 1$ кВт. Це дозволяє порівняти очікувані показники використання ФЕС. Графік розрахункового навантаження $P_{LC}(t)$ прив'язаний до трифазної тарифікації та представлений на рис.1 для літнього періоду. При цьому інтервал ($t_2 = 8{,}00$, $t_3 = 11{,}00$) – час ранкового пікового попиту; інтервали ($t_1 = 7{,}00$, $t_2 = 8{,}00$), ($t_3 = 11{,}00$, $t_4 = 16{,}00$), ($t_4 = 16{,}00$, $t_5 = 20{,}00$), ($t_6 = 23{,}00$, $t_7 = 24{,}00$) – напівпіковий (денний) тариф;

інтервал (t_5 = 20,00, t_6 = 23,00) – час вечірнього пікового попиту. У період осінь-зима-весна години зсуваються. Використовуємо підхід, прийнятий у [10], де вихідне розрахункове значення потужності навантаження приведено до P_{PVR} виходячи із співвідношення P_{PVR} : P_{LP} = 5 : 1 (P_{LP} – потужність навантаження у вечірній пік). При цьому потужність ФБ визначається як P_{PV}= mP_{PVR} (m – коефіцієнт перерахунку потужності ФБ).

Загалом для одного тарифу оплати за електроенергію ступінь зниження споживання енергії з мережі за добу [10]

$$k_E = \frac{W_L}{W_{g62} + W_{g26}}, \quad (1)$$

де W_L – енергія, що споживається навантаженням ЛО;

W_{g62} та W_{g26} – енергія, що споживається з мережі у нічний та денний час.

Енергія, що споживається у нічний час (W_{g62}≥0) без використання заряду АКБ із мережі

$$W_{g62} = (W_{L62} - W_{PV62} \cdot \eta_C), \quad (2)$$

де η_C – ККД перетворювача енергії.

Ступінь зниження споживання з мережі та використання енергії ФБ оцінюється виходячи з можливості виключити споживання енергії в пікові години. Це передбачає, що значення SoC або $Q^*_4 \rightarrow 100\%$ (Q^*=100Q/Q_R, $Q = \int I_B dt$, Q_R=C_B). Тоді для інтервалу (t_4, t_5) маємо наступну картину. АКБ є заряджений, що надалі призводить до регулювання (зниження) генерації ФБ (неповне використання енергії) до рівня споживання навантаженням. При цьому енергія ФБ, що використовується W_{PV45}=kW_{PVM45} (W_{PVM45} – максимальне значення в режимі МРРТ). Аналіз графіків генерації ФБ показує, що з деяким спрощенням для оцінки можна прийняти k = 0,75 при 0,5W_{L45} < W_{PVM45} і k = 1 при 0,5W_{L45} ≥ W_{PVM45}.

Енергія, що споживається з мережі в денний час (W_{g26}≥0) з урахуванням заряду АКБ на інтервалі (t_2, t_4)

$$W_{g26} = W_{g24} + W_{g45} + W_{g56} = (W_{L24} - W_{PV24} \cdot \eta_C) + (W_{L45} - kW_{PVM45} \cdot \eta_C) + (W_{L56} - W_{PVM56} \cdot \eta_C) - \Delta W^1_{B46}, \quad (3)$$

де ΔW^1_{B46} – енергія, що віддається АКБ на інтервалі (t_4, t_6);

W_{g24}≥0, W_{g45}≥0, W_{g56}≥0 – енергія, що споживається з мережі на відповідних інтервалах часу (прийнята позитивною за виключенням генерації < 0);

W_{L62}, W_{L25}, W_{L56} – споживання енергії навантаженням ЛО на відповідних інтервалах часу.

На інтервалах (t_4, t_6) АКБ розряджається і компенсує недостатню для навантаження енергію в межах значення, яке може віддати при DOD≤80% (прийняте обмеження). Це значення становить ΔW_{BM46}=0.8$W_B \cdot \eta_C \cdot \eta_B$ (W_B=$U_B C_B$ – енергоємність АКБ (U_B – напруга АКБ, C_B – ємність АКБ (А·год)). Споживання недостатньої енергії з мережі можливе лише на інтервалі (t_4, t_5). АКБ повинен віддати енергію.

$$\Delta W^1_{B46} = \frac{W_{L46} - (kW_{PV45} \cdot \eta_C + W_{PV56} \cdot \eta_C)}{\eta_C \cdot \eta_B} \le \Delta W_{BM46},$$

де η_B – ККД АКБ.

Якщо $\Delta W^1_{B46} > \Delta W_{BM46}$ приймаємо $\Delta W^1_{B46} = \Delta W_{BM46}$. Для заряду АКБ потрібна енергія.

$$\Delta W_{B46} = \frac{W_{L46} - (kW_{PV45} \cdot \eta_C + W_{PV56} \cdot \eta_C)}{(\eta_C \cdot \eta_B)^2}.$$

Граничне значення енергії ФБ, при якому споживання енергії з мережі в денний час можливе через недостатність енергії ФБ лише на інтервалі (t_4, t_5), складає:

$$W_{PVB26} = \frac{1}{\eta_C}(W_{L24} + kW_{PVM45} \cdot \eta_C + W_{PVM56} \cdot \eta_C + \Delta W_{B46}). \quad (4)$$

Значення W_{PVB26} є обмеженням для використання денної генерації ФБ. Для забезпечення балансу потужності генерація ФБ знижується. Тобто при $W_{PV26} \geq W_{PVB26}$ приймаємо значення $W_{PV26} = W_{PVB26}$.

Розрахунки виконуються за прийнятим розрахунковим графіком відповідно до (1) – (4). Зазначимо, що використовуються значення енергії у денний та нічний час. Очікувані значення $k_{EГ}$ за рік (табл. 1) розраховані виходячи із загального споживання навантаження за n днів за 5 років та споживання з мережі

$$k_{EГ} = \frac{nW_L}{\sum_1^n (W_{g62} + W_{g26})}.$$

Таблиця 1

Розраховані значення k_{PV} і k_E

m	1	0,75	0,7	0,65
k_{EII}	6,448	5,034	4,657	4,226
k_{EAV}	7,21	6,47	6,253	5,92
$k_{EГ}$	2,334	2,085	2,023	1,953
k_{PV}	0,697	0,844	0,8809	0,918
d	12,44	4,79	3,42	2,19

В табл. 1 також наведено значення k_{EII} для червня та ступеню використання енергії ФБ k_{PV} з роботи [10]. Для кращого сприйняття ступеня використання енергії ФБ у табл. 1 наведено значення d, відповідне кількості днів, споживання яких можна було б забезпечити у червні за рахунок не використаної енергії ФБ. Для порівняння у табл. 1 наведенні середні для червня значення k_{EAV} за 5 років [10], які є завищеними в 1,12–1,4 рази.

Таким чином, облік розподілу та використання енергії ФБ щодня за тривалий період часу дозволяє при розрахунку показників системи оцінити їх очікувані значення за аналогічний період часу. При використанні для самоспоживання ЛО вони суттєво відрізняються від результатів розрахунку за середнім значенням.

Розрахунок заданого значення P_g [15, 10] проводиться відповідно до прийнятого графіка навантаження $P_{LC}(t)$ і прогнозу потужності генерації ФБ $P_{PVF}(t)$ виходячи з максимального використання P_{PV} при максимально (допустимому) значенні DOD. При цьому розрахунок виконується виходячи з досягнення необхідних значень Q^* в кінці прийнятих інтервалів часу. Відхилення P_L у межах середнього значення на інтервалах не впливають на результуючі показники. Однак, при генерації $P_{PV} > P_{PVF}$ і $P_L = P_{LC}$ отримуємо зниження ступеня використання енергії ФБ при тому ж споживанні енергії з мережі. Аналогічну картину маємо при $P_{PV} = P_{PVF}$ і $P_L < P_{LC}$. Найгірший ефект має місце при зниженні $P_{PV} < P_{PVF}$ або збільшенні навантаження, коли не забезпечується заряд АКБ при підвищенні DOD. Таким чином, виникає необхідність регулювання (корекції) значення P_g.

Як критерій регулювання може бути підтримка заданого графіка $Q^*(t)$ [19]. Швидкість зміни $Q^*(t)$ є невелика, що дозволяє здійснювати корекцію дискретно. Так при дискретності Δt = 0,5 годин на інтервалі (t_3, t_4), де здійснюється основний заряд АКБ, маємо заряд (у граничному випадку) від 20% (DOD = 80%) до Q^* = 100%. При тривалості інтервалу (t_3, t_4) 5 годин ($10\Delta t$) середнє значення ΔQ^* = 8%. Якщо прийняти можливу помилку ΔQ^*_C = 4% (50% від ΔQ^*), то для її компенсації необхідно скоригувати значення P_g на

$$\Delta P_K = \frac{0.01\Delta Q^*_C \cdot W_B}{\eta_C \cdot \eta_B \cdot \Delta t}.$$

Для прийнятого графіка ΔP_K = 100 Вт, що становить $0.5P_{LIM}$ (P_{LIM} = 200 Вт – ліміт на споживання з мережі) і є реальним. Прийняте значення ΔQ^*_C досить велике і при цьому маємо для інтервалу (t_3, t_4) заряд АКБ не 80%, а 40%.

Використання корекції передбачає деякі особливості розрахунку графіка $P_g(t)$. Розрахунок проводиться наприкінці вечірнього піку (t_6) за прогнозом наступного дня. Враховуємо прийнятий підхід з виключенням споживання з мережі у години пікового попиту ($P_{g23} = P_{g56} = 0$). При цьому розглядаємо наступні контрольні значення для графіка $Q^*(t)$: ступінь заряду до початку ранкового піку (Q^*_2, t_2); ступінь заряду до кінця ранкового піку (Q^*_3, t_3); ступінь заряду на години зниження сонячної активності (Q^*_4, t_4); ступінь заряду до початку вечірнього піку (Q^*_5, t_5); ступінь заряду до кінця вечірнього піку (Q^*_6, t_6). При цьому обмеження DOD відповідає Q^*_6.

Для виключення споживання у вечірній пік значення Q^*_4 має бути достатнім для забезпечення споживання на інтервалі (t_4, t_6)

$$Q^*_4 = Q^*_6 + \Delta Q^*_{56} + \Delta Q^*_{45}. \quad (5)$$

З іншого боку $Q^*_4 = Q^*_2 + \Delta Q^*_{24}$. Тривалість вечірнього піку влітку 3 години, в решту сезонів 4 години при однаковому піковому навантаженні. Влітку з урахуванням збільшення можливого відхилення генерації ФБ до 20% доцільним є вирівнювання завдання споживаної потужності. Можна використовувати два варіанти формування графіка $Q^*(t)$: В1 – максимальний заряд с $Q^*_4 \rightarrow 100\%$; В2 – достатній за умовою (5) з вирівнюванням споживання $P_{g34} = P_{g45}$. Варіант В2 має на меті зниження P_{g34} без обмеження значення $\Delta P_K = (P_{LIM} - P_{g34})$ для забезпечення можливості корекції. Можна прийняти умову для В1 $P_{g34} \leq 0{,}7P_{LIM}$.

Оцінка ступеня генерації ФБ визначається значенням

$$\Delta Q^*_{24} = \frac{mW_{PV24} \cdot \eta_C - W_{L24}}{0.01W_B \cdot \eta_C \cdot \eta_B}. \quad (6)$$

Якщо $\Delta Q^*_{24} < 0$, то приймається $Q^*_2 = 100\%$. Значення P_{g34}

$$P_{g34} = \frac{W_{L34} + 0.01\Delta Q^*_{34} \cdot W_B / \eta_C \cdot \eta_B - W_{PV34} \cdot \eta_C \cdot m}{(t_4 - t_2)}, \quad (7)$$

де $\Delta Q^*_{34} = Q^*_4 - (Q^*_2 - \Delta Q^*_{23})$, ΔQ^*_{23} визначається аналогічно ΔQ^*_{24} (6).

Значення ΔQ^*_{56} також визначається аналогічно (6). Необхідне значення $\Delta Q^*_{45} = Q^*_4 - (Q^*_6 - \Delta Q^*_{56})$. Відповідне значення P_{g45} визначається аналогічно (7).

Влітку, якщо $P_{g34} > 0{,}7P_{LIM}$ реалізується вирівнювання споживання та визначається

$$\Delta Q^*_{35} = (Q^*_6 - \Delta Q^*_{56}) - (Q^*_2 - \Delta Q^*_{23}).$$

Відповідне значення P_{g35} визначається аналогічно (7).

Якщо $\Delta Q^*_{24} \geq 0$, то приймається $Q^*_4 = Q^*_5 - \Delta Q^*_{45} = (Q^*_6 - \Delta Q^*_{56}) - \Delta Q^*_{45}$, де ΔQ^*_{45} визначається аналогічно (6) при $W_{PV45} = kW_{PVM45}$.

При $Q^*_4 > 100\%$ приймається $Q^*_4 = 100\%$ і $\Delta Q^*_{45} = 100 - Q^*_5$. Відповідне значення P_{g45} визначається аналогічно (7). При $Q^*_4 \leq 100\%$ значення $P_{g45} = 0$. В обох випадках $P_{g34} = 0$.

Значення $Q^*_2 = (Q^*_4 - \Delta Q^*_{24}) \geq Q^*_{2MIN}$, де $Q^*_{2MIN} \geq Q^*_{MIN} - \Delta Q^*_{2+1}$, $Q^*_{MIN} = 100 - \text{DOD}$, $\Delta Q^*_{2+1} = Q^*_{2+1} - Q^*_2$ (Q^*_{2+1} ступінь заряду в момент часу t_{2+1} – плюс 1 година), якщо $\Delta Q^*_{2+1} \geq 0$, то $\Delta Q^*_{2+1} = 0$.

Також для виключення генерації електроенергії в мережу при корекції P_g введено обмеження по виміряній потужності навантаження.

Вечірній пік. В години вечірнього піку потужність, що видається інвертором, $P_{C56} = P_{L56} - P_{g56}$. За цього струм розряду $I_{B56} = P_{C56} / U_{BAV}$.

Нічний заряд АКБ реалізується згідно з значенням Q^*_2 і Q^*_6 за методикою [15].

Розрахунок графіка Q*(t) виконується за методикою [19].

Для перевірки запропонованих рішень виконано моделювання в Matlab. За основу прийнята методика та (24 h) модель енергетичних процесів, приведена в [15]. Модель доповнена модулем корекції Q^*. При цьому змінна, яка задає потужність, що споживається з мережі:

$$P_{gR} = P_g + P_K \cdot t_{26}.$$

Значення P_K з урахуванням похибки вимірювання Q^* (прийнято ±5%)

$$P_K = \frac{(Q^*_R - Q^*_M + \Delta Q^*_M)0.01W_B}{\eta_C \cdot \eta_B \cdot \Delta t},$$

де Q^*_R і Q^*_M – фактичне і виміряне значення *SoC*, $\Delta Q^*_M = -0{,}05Q^*_M$ для $Q^*_M = 0{,}95Q^*$, $\Delta Q^*_M = 0{,}05Q^*_M$ для $Q^*_M = 1{,}05Q^*$.

Результати моделювання. Показники роботи ФЕС для різного ступеня відхилення навантаження від розрахункового $P^*_L = P_L/P_{LC}$ і генерації ФБ від прогнозу $P^*_{PV}=P_{PV}/P_{PVF}$ без корекції (-) та при використанні корекції (+) при $m = 0{,}7$ для варіанта навантаження 1 приведені в табл. 2. При цьому прийнятий графік навантаження [10]: $P_{L23} = 200$ Вт, $P_{L34} = 180$ Вт, $P_{L45} = 160$ Вт, $P_{L56} = 200$ Вт, $P_{L56} = 60$ Вт. Значення енергоємності АКБ прийнято із запасом 5% $W_B = 1178$ Вт·год, що при напрузі АКБ $U_B = 25{,}6$ В відповідає $C_B = 46$ А·год.

При цьому розглядались день у березні та лютому при генерації ФБ близької до середньомісячної, а також хмарний день у липні. При DOD вище прийнятого значення 20%, значення k_E не оцінювалося.

Аналогічні показники приведені в табл. 3 для варіанта навантаження 2: $P_{L23} = 120$ Вт, $P_{L34} = 100$ Вт, $P_{L451} = 120$ Вт, $P_{L452} = 160$ Вт, $P_{L56} = 200$ Вт (інтервал (t_4, t_5) розділений на два з різним навантаженням). В даному випадку основний попит на споживання зміщений на вечірній час. Виходячи з умови максимального використання енергії ФБ при середньомісячній генерації в червні прийнято значення $m = 0{,}51$.

Осцилограми потужності навантаження P_L, потужності, що віддає інвертор P_C, потужності ФБ P_{PV}, потужності, що споживається з мережі P_g, ступеню заряду АКБ Q^*, струму АКБ I_B при використанні корекції наведені на рис. 1: а) день липня при $P^*_{PV} = 0{,}8$, $P^*_L = 1{,}1$ (варіант 1) без вирівнювання P_g; б) день липня при $P^*_{PV} = 0{,}8$, $P^*_L = 1{,}1$ (варіант 1) з вирівнюванням P_g; в) день березня при $P^*_{PV} = 0{,}8$, $P^*_L = 1{,}1$ (варіант 1); г) день лютого при $P^*_{PV} = 0{,}8$, $P^*_L = 1{,}1$ (варіант 1); д) день липня при $P^*_{PV} = 0{,}8$, $P^*_L = 1{,}1$ (варіант 2); д) день липня при $P^*_{PV} = 0{,}8$, $P^*_L = 1{,}0$ (варіант 2).

Таблиця 2

Порівняння показників без корекції та при використанні корекції при *m* = 0.7 для варіанта навантаження 1

P^*_{PV}, в.о	P^*_L, в.о	Лютий				Березень				Липень			
		DOD, %		k_E, в.о		*DOD*, %		k_E, в.о		*DOD*, %		k_E, в.о	
		-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
1	1	78,6	78,6	1,5	1,5	79,8	78	1,95	1,91	79	79,2	1,3	1,3
1	0,8	58,8	62	1,28	1,43	56	69	1,7	1,88	41,5	67	1,09	1,31
1	1,1	100	79,9	-	1,44	100	79,9	-	1,8	100	80	-	1,27
0,8	1	100	78,8	-	1,34	100	78	-	1,6	95	79,2	1,3	1,21
0,8	1,1	100	79,9	-	1,3	100	80	-	1,53	100	80	-	1,19
0,8	0,8	60	62	1,28	1,33	63,5	62	1,69	1,66	47,4	77	1,08	1,2

Таблиця 3

Порівняння показників без корекції та при використанні корекції при m = 0.7 для варіанта навантаження 2

Липень					
P^*_{PV}, в.о	P^*_L, в.о	*DOD*, %		k_E, p.u	
		-	+	-	+
1	1	79,2	79,2	1,258	1,257
1	0,8	45,7	66,8	1,07	1,24
1	1,1	98	80	-	1,234
0,8	1	90,8	79,8	-	1,18
0,8	1,1	100	80	-	1,16
0,8	0,8	56,6	67	1,07	1,15

У варіанті 1 для хмарного дня липня (рис. 1а) і (рис. 1б) варіант з вирівнюванням значенням P_g є найбільш вигідним. При цьому має місце вирівнювання графіка споживання та, головне, що за відсутності вирівнювання можливості корекції на інтервалі (t_3, t_4) обмежуються значенням $P_g = P_{LIM}$. У даному випадку P_{g34} = 170 Вт і корекція дозволила вийти на розрахунковий графік, але при зниженні k_E на 3%.

Висновки. Техніка з оцінкою очікуваних значень ступенів зниження споживання електроенергії та використовування встановленої потужності ФБ по архівним даним за 5 років дозволяє підвищити достовірність оцінки очікуваних показників за рік при виборі параметрів ФЕС. При цьому враховується енергоємність АКБ та можливе неповне використання енергії ФБ, що має місце після повного заряду АКБ. Очікуване значення ступеня зниження споживання електроенергії з мережі при однакових умовах у порівнянні з [10] для червня для *m* = 0,7 нижче в 1,34 рази.

При малій генерації ФБ доцільним для забезпечення можливості корекції потужності є вирівнювання споживання P_{g34}=P_{g45}, що при великих відхиленнях генерації ФБ дозволяє запобігти обмеження $P_g \leq P_{LIM}$. Для виключення генерації електроенергії в мережу при корекції P_g введено обмеження за виміряною потужністю навантаження.

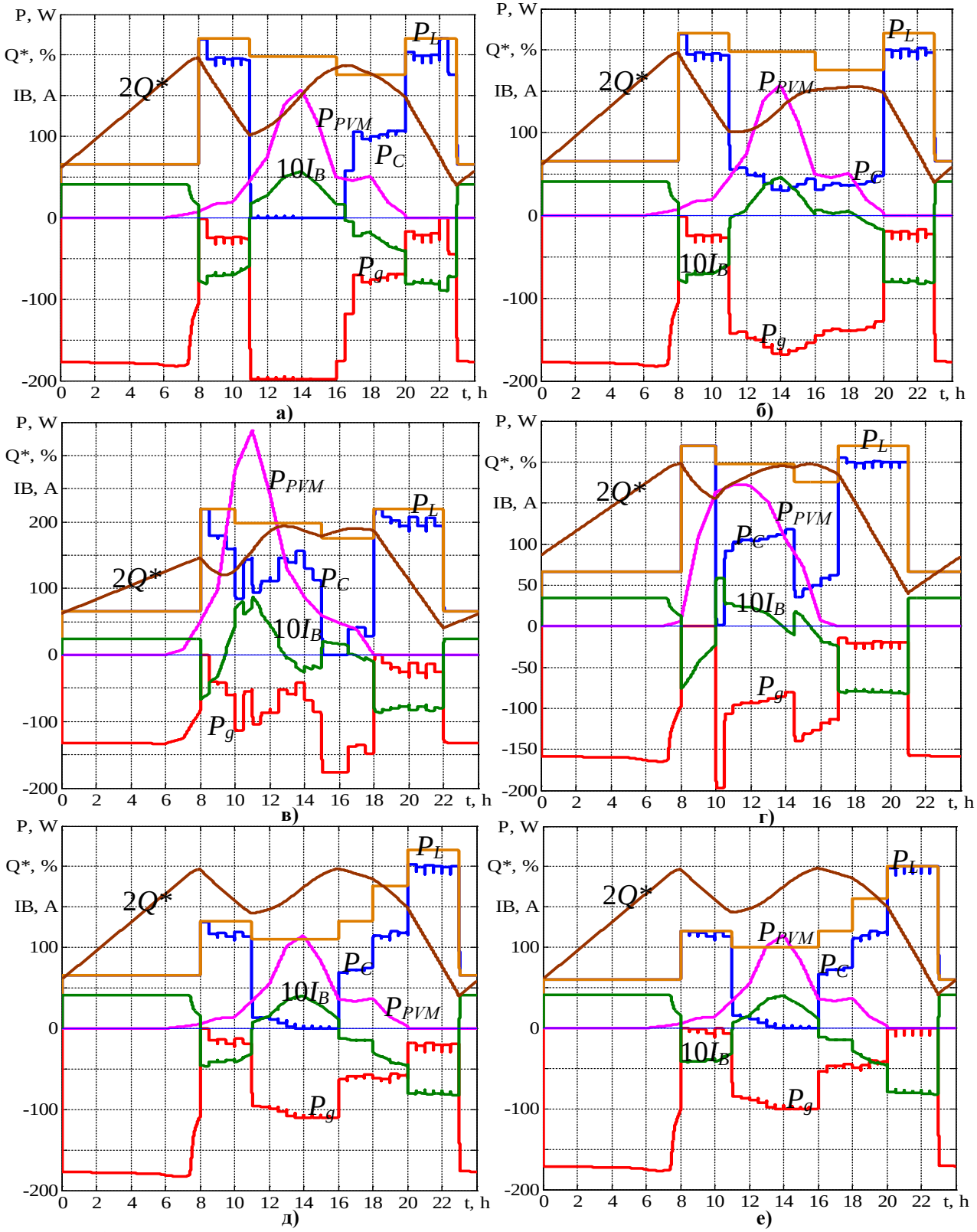


Рис. 2. **Осцилограми P_L, P_C, P_{PV}, Q^*, I_B, P_g: а) день липня при P^*_{PV} = 0,8, P^*_L = 1,1 (варіант 1) без вирівнювання P_g; б) день липня при P^*_{PV} = 0,8, P^*_L = 1,1 (варіант 1) з вирівнюванням P_g; в) день березня при P^*_{PV} = 0,8, P^*_L = 1,1 (варіант 1); г) день лютого при P^*_{PV} = 0,8, P^*_L = 1,1 (варіант 1); д) день липня при P^*_{PV} = 0,8, P^*_L = 1,1 (варіант 2); е) день липня при P^*_{PV} = 0,8, P^*_L = 1,0 (варіант 2)**

Математична модель енергетичних процесів в режимі 24 години враховує похибку вимірювання SoC ± 5%. Моделювання виконувалось для двох варіантів розрахункового графіка $P_{LC}(t)$ з різним розподілом навантаженням, враховуючи, пікове для днів зі середньомісячною генерацією ФБ в лютому, березні та при низькій генерації ФБ в липні. Показано, що при прийнятих графіках навантаження та відсутності корекції збільшення навантаження на 10% при $P_{PV}(t) = P_{PVF}(t)$ або зниження генерації ФБ на 20% при розрахунковому навантаженні призводить до неприпустимого зниження DOD. Корекція P_g з дискретністю Δt = 0,5 в розглянутих випадках дозволяє забезпечити формування $SoC_C(t)$ при відхиленні $P_{PV}(t)$ до $0{,}8P_{PVF}(t)$ і $P_L(t)$ до $1{,}1P_L(t)$. При $P_L(t)$ нижче $P_{LC}(t)$ є можливість зниження витрат на 7–22% за рахунок підвищення ступеню використання енергії ФБ. Вирівнювання споживання на інтервалах $P_{g34} = P_{g45}$ в розглянутому випадку при відхиленні генерації ФБ відносно прогнозу на 20% дозволило обмежити DOD і збільшити k_E на 3%.

Розвиток роботи передбачає подальше удосконалення техніки розрахунку з використанням тарифікації оплати за електроенергію та управління ФЕС при різних сценаріях роботи.

References

1. Pater, S. (2023). Increasing Energy Self-Consumption in Residential Photovoltaic Systems with Heat Pumps in Poland. *Energies*, 16(10), 4003. https://doi.org/10.3390/en16104003.

2. Luthander, R., Widén, J., Nilsson, D., Palm, J. (2015). Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied Energy*, Vol. 142, P. 80–94. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028.

3. Khezri, R., Mahmoudi, A., Aki, H. (2022). Optimal planning of solar photovoltaic and battery storage systems for grid-connected residential sector: Review, challenges and new perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 153. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111763.

4. Kumar, N. M., Chopra, S. S., Chand, A. A., Elavarasan, R. M., Shafiullah, G. M. (2020). Hybrid Renewable Energy Microgrid for a Residential Community: A Techno-Economic and Environmental Perspective in the Context of the SDG7. *Sustainability*, 12, 3944; DOI: 10.3390/su12103944.

5. Kamjoo, A., Maheri, A., Putrus, G. A., Dizqah, A. M. (2012). Optimal sizing of grid-connected hybrid wind-pv systems with battery bank storage. Conference Paper. URL: https://www.researchgate.net/publication/231205795.

6. Photovoltaic geographical information system. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ tools.html#SA.

7. Shavolkin, O., Shvedchykova, I. (2020). Improvement of the multifunctional converter of the photoelectric system with a storage battery for a local object with connection to

Література

1. Pater S. Increasing Energy Self-Consumption in Residential Photovoltaic Systems with Heat Pumps in Poland. *Energies*. 2023. 16(10). 4003. https://doi.org/10.3390/en16104003.

2. Luthander R., Widén J., Nilsson D., Palm J. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied Energy*. 15 March 2015. Vol. 142. P. 80–94. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028.

3. Khezri R., Mahmoudi A., Aki H. Optimal planning of solar photovoltaic and battery storage systems for grid-connected residential sector: Review, challenges and new perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, January 2022, Vol. 153. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111763.

4. Kumar N. M., Chopra S. S., Chand A. A., Elavarasan R. M., Shafiullah G. M. Hybrid Renewable Energy Microgrid for a Residential Community: A Techno-Economic and Environmental Perspective in the Context of the SDG7. *Sustainability*. 2020. 12. 3944. DOI: 10.3390/su12103944.

5. Kamjoo A., Maheri A., Putrus G. A., Dizqah A. M. Optimal sizing of grid-connected hybrid wind-pv systems with battery bank storage. Conference Paper. January 2012. URL: https://www.researchgate.net/publication/231205795.

6. Photovoltaic geographical information system. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#SA.

7. Shavolkin O., Shvedchykova I. Improvement of the multifunctional converter of the photoelectric system with a storage battery for a

a grid. *Proceedings of the IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, P. 287–292. DOI: 10.1109/ KhPIWeek51551.2020.9250096.

8. Conext SW. Hybrid Inverter. URL: https://www.se.com/ww/en/product-range-presentation/61645-conext-sw/

9. Shavyolkin, O. O., Marchenko, R. M., Stanovskyi, E. Yu., Pidgainy, M. O., Kruglyak, G. V. (2021). Vyznachennia parametriv fotoelektrychnoi systemy z akumuliatorom dlia potreb lokalnoho ob'iektu [Determining the parameters of a photovoltaic system with a battery for the needs of a local facility]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh = Technologies and Engineering*, 4, P. 41–50. DOI: 10.30857/2786-5371.2021.4.4 [in Ukrainian].

10. Shavolkin, O., Shvedchykova, I., Romanchenko, J., Marchenko, R., Yakymets, S. (2022). Installed Power of the Grid-Tied Photovoltaic System with Battery for Self-Consumption of the Local Object. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, P. 1–6. DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005628.

11. Zheng Zeng, Huan Yang, Rongxiang Zhao, Chong Cheng (2013). Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24 (2013), P. 223–270. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.033.

12.Vigneysh, T., Kumarappan, N. (2017). Grid interconnection of renewable energy sources using multifunctional grid-interactive converters: A fuzzy logic based approach, *Electric Power Systems Research*, No. 151, P. 359–368.

13. Guerrero-Martinez, M. A., Milanes-Montero, M. I., Barrero-Gonzalez, F., Miñambres-Marcos, V. M., Romero-Cadaval, E., Gonzalez-Romera, E. (2017). A Smart Power Electronic Multiconverter for the Residential Sector. *Sensors*, 17, 1217, 16 p.; DOI: 10.3390/s17061217. URL: www.mdpi.com/journal/sensors.

14. Barelli, L., Bidini, G., Bonucci, F., Castellini, L., Castellini, S., Ottaviano, A., Pelosi, D., Zuccari, A. (2018). Dynamic Analysis of a Hybrid Energy Storage System (H-ESS) Coupled to a Photovoltaic (PV) Plant. *Energies*, 11, 396; DOI:10.3390/en11020396.

15. Shavolkin, O., Shvedchykova, I., Lishchuk, V., Stanovskyi, Y. (2023). Improving a model of the hybrid local object with connection to a grid. *Proceedings of the IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020. P. 287–292. DOI: 10.1109/KhPIWeek51551. 2020.9250096.

8. Conext SW. Hybrid Inverter. URL: https://www.se.com/ww/en/product-range-presentation/61645-conext-sw/

9. Шавьолкін О. О., Марченко Р. М., Становський Є. Ю., Підгайний М. О., Кругляк Г. В. Визначення параметрів фотоелектричної системи з акумулятором для потреб локального об'єкту. *Технології та інжиніринг*. 2021. № 4. С. 41–50. DOI: 10.30857/2786-5371.2021.4.4.

10. Shavolkin O., Shvedchykova I., Romanchenko J., Marchenko R., Yakymets S. Installed Power of the Grid-Tied Photovoltaic System with Battery for Self-Consumption of the Local Object. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine, 2022, P. 1–6. DOI: 10.1109/MEES58014.2022. 10005628.

11. Zheng Zeng, Huan Yang, Rongxiang Zhao, Chong Cheng. Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. 24 (2013), P. 223–270. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.033.

12. Vigneysh T., Kumarappan N. Grid interconnection of renewable energy sources using multifunctional grid-interactive converters: A fuzzy logic based approach, *Electric Power Systems Research*. 2017. No. 151. P. 359–368.

13. Guerrero-Martinez M. A., Milanes-Montero M. I., Barrero-Gonzalez F., Miñambres-Marcos V. M., Romero-Cadaval E., Gonzalez-Romera E. A Smart Power Electronic Multiconverter for the Residential Sector. *Sensors*. 2017. 17. 1217. 16 p.; DOI: 10.3390/s17061217. URL: www.mdpi.com/journal/sensors.

14. Barelli L., Bidini G., Bonucci F., Castellini L., Castellini S., Ottaviano A., Pelosi D., Zuccari A. Dynamic Analysis of a Hybrid Energy Storage System (H-ESS) Coupled to a Photovoltaic (PV) Plant. *Energies*. 2018. 11. 396; DOI:10.3390/en11020396.

15. Shavolkin O., Shvedchykova I., Lishchuk V., Stanovskyi Y. Improving a model

photovoltaic system with a storage battery for local object's self-consumption involving the setting of power consumed from the grid. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8(123)), P. 6–16. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.280053.

16. Mellit, A., Massi Pavan, A., Lughi, V. (2021). Deep learning neural networks for short-term photovoltaic power forecasting. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 172. P. 276–288. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.166.

17. Forecast. Solar. URL: https://forecast.solar/

18. Iyengar, S., Sharma, N., Irwin, D., Shenoy, P., Ramamritham, K. (2014). SolarCast – an open web service for predicting solar power generation in smart homes. *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Buildings*, 2014, November, P. 174–175. https://doi.org/10.1145/2674061.2675020.

19. Shavolkin, O., Shvedchykova, I., Kolcun, M., Medveď, D. (2023). Improvement of a Hybrid Solar-Wind System for Self-Consumption of a Local Object with Control of the Power Consumed from the Grid. *Energies*, 16, 5851. https://doi.org/10.3390/en16155851.

20. Iyengar, S., Sharma, N., Irwin, D., Shenoy, P., Ramamritham, K. (2016). A Cloud-based Black Box Solar Predictor for Smart Homes. *ACM Reference Format: ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.*, 1(4), Article No.: 21, P. 1–24. https://doi.org/10.1145/3004056

21. 24-hour Simulation of a Vehicle-to-Grid (V2G) System. URL: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/24-hour-simulation-of-a-vehicle-to-grid-v2g-system.html.

22. Simscape Electrical. URL: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.html.

of the hybrid photovoltaic system with a storage battery for local object's self-consumption involving the setting of power consumed from the grid. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. 3(8(123). P. 6–16. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.280053.

16. Mellit A., Massi Pavan A., Lughi V. Deep learning neural networks for short-term photovoltaic power forecasting. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 172. P. 276–288. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.166.

17. Forecast. Solar. URL: https://forecast.solar/

18. Iyengar S., Sharma N., Irwin D., Shenoy P., Ramamritham K. SolarCast – an open web service for predicting solar power generation in smart homes. *Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Buildings*. 2014. November. P. 174–175. https://doi.org/10.1145/2674061.2675020.

19. Shavolkin O., Shvedchykova I., Kolcun M., Medveď D. Improvement of a Hybrid Solar-Wind System for Self-Consumption of a Local Object with Control of the Power Consumed from the Grid. *Energies*. 2023. *16*. 5851. https://doi.org/10.3390/en16155851.

20. Iyengar S., Sharma N., Irwin D., Shenoy P., Ramamritham K. A Cloud-based Black Box Solar Predictor for Smart Homes. *ACM Reference Format: ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.* 2016. Vol. 1, Iss. 4. Article No.: 21. P. 1–24. https://doi.org/10.1145/3004056.

21. 24-hour Simulation of a Vehicle-to-Grid (V2G) System. URL: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/24-hour-simulation-of-a-vehicle-to-grid-v2g-system.html.

22. Simscape Electrical. URL: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.html.

SHAVOLKIN OLEXANDER
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Computer Engineering
and Electromechanics,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-3914-0812
Researcher ID: T-2652-2018
E-mail: shavolkin@gmail.com

MARCHENKO RUSLAN
PhD student, Department of Computer
Engineering and Electromechanics,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
https://orcid.org/0009-0004-2585-6208
E-mail: r.marchencko@ukr.net

SHAVOLKIN O. O., MARCHENKO R. M.
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

IMPROVING THE TECHNIQUE FOR CALCULATING THE PARAMETERS AND CONTROL OF A HYBRID PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH BATTERY FOR SELF-CONSUMPTION OF A LOCAL OBJECT

Purpose. *Increasing the degree of energy use of a hybrid photovoltaic system with a battery for the local object's own consumption, taking into account deviations in the load schedule relative to the calculated one and energy generation relative to the forecast value while reducing electricity consumption from the grid.*

Methodology. *Analytical methods of calculation in electrical circuits and results of processing archival data of photovoltaic battery generation for a given point of location of the object using computer simulation to evaluate the results.*

Results. *The technique for selecting parameters of a photovoltaic system based on archival generation data for 5 years has been improved, making it possible to increase the reliability of estimating the expected values of the degree of reduction in electricity consumption.*

Originality. *The control principle with setting the active power based on the forecast of the generation of a photovoltaic battery according to the accepted load schedule with correction in the process of forming a graph of the battery charge level SoC(t) has been developed. This provides the possibility of compensating deviations of the load schedule from the estimated and generation of the photovoltaic battery with respect to the forecast value up to 20% while reducing the electricity consumption and increasing the degree of utilization of the energy of the photovoltaic battery. This is carried out at a given limit on the depth of battery discharge. Compliance of the actual SoC(t) schedule with the given one is achieved by adjusting the active power consumption from the grid according to the SoC deviation with a given time discreteness. A variant of forming the SoC(t) graph is proposed, which provides the possibility of correction during low generation of a photovoltaic battery with leveling the power consumption graph.*

Practical value. *The obtained decision regarding the formation of the SoC(t) graph can be used in the design of photovoltaic systems for the self-consumption of local objects.*

Keywords: *hybrid photovoltaic system; parameter determination technique; the active power setting value; battery state of charge graph; correction of deviation; 24 h simulation.*

https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.7

УДК 678.438.47.2

САВЧЕНКО Б. М., СОВА Н. В., ХОМЕНКО В. Г., СЛЄПЦОВ О. О., БУЛГАКОВ Є. С., СЛЄПЧЕНКО Р. Ю.
Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ СТВОРЕННІ МЕТАМАТЕРІАЛІВ З РЕГУЛЬОВАНИМИ ДІЕЛЕКТРИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Мета дослідження. *Метою даної статті є дослідження впливу програмованої просторової структури розподілу матеріалів, отриманих методом адитивного виробництва на їх діелектричні властивості.*

Методи дослідження. *Дослідження діелектричних характеристик дослідних зразків здійснювалось шляхом вимірювання їх ємності та тангенса кута діелектричних втрат з використанням пристрою RLC-метр DER EE LCR METER DE-5000 за 4-х електродною схемою з додатковим контактним пристроєм TL-21. Вимірювання проводились із застосуванням змінного струму та вимірювальних частот 100 Гц, 1-10-100 кГц.*

Результати. *Відносна діелектрична проникність з високою достовірністю лінійно залежить від питомої густини та ступеня об'ємного заповнення та в незначній мірі змінюється в залежності від частоти вимірювання. Підвищення температури здатне змінювати значення відносної діелектричної проникності тільки у випадку монолітних зразків на 2,5% при температурі 50°С. Значення відносної діелектричної проникності, розраховані за теоретичними моделями, збігаються з виміряними для всіх значень об'ємного заповнення. Застосування програмного заповнення дозволяє ефективно варіювати відносну діелектричну проникність матеріалів.*

Наукова новизна. *Встановлено, що відносна діелектрична проникність дослідних зразків полілактиду має лінійний характер залежності від ступеня об'ємного заповнення.*

Практична значимість. *Встановлено, що використання програмного заповнення дослідних зразків підчас адитивного виробництва дозволяє створювати матеріали з регульованими значеннями відносної діелектричної проникності при створенні виробів радічастотного призначення.*

Ключові слова: *адитивне виробництво; полімерні матеріали; програмовані структури; відносна діелектрична проникність.*

Вступ. Полімерні матеріали широко використовуються в електротехнічній галузі промисловості для виготовлення ізоляційних матеріалів для кабелів та проводів, компонентів електронних пристроїв, екранів, конденсаторів та інших елементів. Полімери за своїми електричними властивостями поділяються на діелектрики, напівпровідники та електропровідні матеріали. Поділ між цими класами досить умовний. Для діелектриків характерні значення провідності нижче 10^{-10} См/см. Полімери з вищою питомою електричною провідністю відносяться до класу напівпровідників. Якщо провідність понад 1 См/см, то полімери вважають електропровідними [1].

Для діелектриків характерна дуже низька питома електропровідність, яка збільшується з підвищенням температури. Більшість полімерів належать до діелектриків. Проте їх діелектричні властивості різні і залежать від складу та структури макромолекул, зокрема від кількості полярних груп та їх виду. Так, наприклад, гідроксильні, галогенні, карбоксильні та інші полярні групи погіршують діелектричні властивості полімерів. Тобто, полімери, що не мають полярних замісників є добрими діелектриками. Збільшення молекулярної маси полімерів зумовлює покращення діелектричних властивостей. У випадку переходу від склоподібного до високоеластичного і в'язкотекучого станів відбувається зростання питомої електричної провідності полімерів [2].

Електрична провідність діелектриків сильно залежить від руху іонів, що утворюються при деструкції полімерів, а також наявності домішок, низькомолекулярних продуктів поліконденсації, розчинників, ініціаторів чи каталізаторів полімеризації. Для покращення

діелектричних властивостей доцільно мінімізувати вміст домішок в полімері. Гідроксильні функціональні групи в полімерах зумовлюють їх гідрофільність, тобто здатність поглинати вологу, і як наслідок, підвищення електричної провідності полімерів [3–5].

Адитивне виробництво сучасна технологія перетворення програмних просторових моделей у фізичну форму зокрема з застосуванням полімерів. Адитивне виробництво в сучасності це технологія масового виробництва деталей та конструкцій, що дозволяє виробляти одиничний виріб з високою складністю просторової форми. Важливе застосування адитивних технологій під час виробництва корпусів та деталей електронної техніки, зокрема дорнів та пристроїв зв'язку [6–9].

Відносна діелектрична проникність, кут діелектричних втрат це основні властивості полімерних діелектриків. Сучасні застосування полімерних діелектриків включають застосування їх у складі високочастотних пристроїв. Діелектричні властивості важливі для зменшення витрат енергії для здійснення передачі даних [10–11].

Дослідження діелектричних характеристик матеріалів та структур створених адитивним виробництвом дозволить здійснювати коректне проектування радіочастотних характеристик таких пристроїв, що забезпечить їх правильне функціонування.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження впливу програмованої просторової структури розподілу матеріалів, отриманих методом адитивного виробництва на їх діелектричні властивості**.**

Вихідні матеріали та методи. Для досліджень використано мононитку з полілактиду марки Total Corbion Luminy L175. Для вимірювання діелектричних характеристик використовували зразок циліндричної форми діаметром 150 мм та товщиною 5мм. Зразок виготовляли адитивним виробництвом шляхом пошарового нанесення розплаву полімеру з використанням пристрою для адитивного виробництва алюмейкер конструктивного виконання типу Prusa I3. Просторову модель зразка створювали у графічному ректорі Solid Works. Модуль зразка зберігали в формат .stl та перетворювали у машинний код G-kod з використанням програми Cura 5.0. параметри перетворення моделі у машинний код наведено в табл 1.

Таблиця 1

Параметр перетворення моделі у машинний код

№	Параметр	Значення
1	Діаметр сопла, мм	0,6
2	Ширина екструзії, мм	0,6
3	Висота шару,	0,3
4	Коефіцієнт екструзії	1
5	Ретракт, мм	1
6	Швидкість загальна, мм/хв	40
7	Швидкість для заповнення, мм/хв	40
8	Швидкість для периметрів, мм/хв	30
9	Температура сопла, ºС	210
10	Температура стола, ºС	60
11	Заповнення, %	0–100
12	Заповнення – тип	Hyroid, Lines, Triangles
13	Периметри, шт	2
14	Нижній шар, шт	0
15	Верхній шар, шт	0
16	Спідниця, шт	4
17	Кількість ліній заповнення, шт	1 та (1-13)

Програмні моделі перетворювались у машинний код з ступенем просторового заповнення від 0 до 100%. Всі інші параметри були незмінними.

Використовували програмні заповнення, гіроїд, лінії та трикутники, що вбудовані в програмне забезпечення Cura 5.0

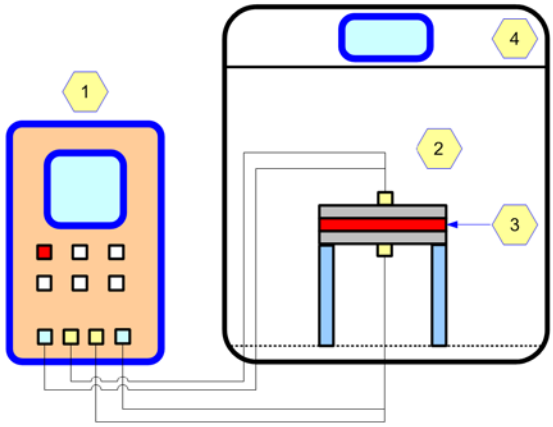
Машинний код моделей передавався на пристрій для адитивного виробництва на змінному носії та здійснювалось адитивне виробництво дослідних зразків.

Перед адитивним виробництвом мононитка висушувалась при 40 ℃ протягом 12 год. Платформа побудови 3д принтеру була скляна без застосування адгезивів.

Дослідні зразки після адитивного виробництва піддавали зважуванню на аналітичних вагах та вимірювання товщини за допомогою мікрометру.

Для дослідження діелектричних характеристик використовувався RLC-метр DER EE LCR METER DE-5000. Використовувалась 4-х електродна схема вимірювання з додатковим контактним пристроєм TL-21. Проводилось вимірювання ємності та тангенса кута діелектричних втрат дослідних зразків з застосуванням змінного струму та вимірювальних частот 100 Гц, 1-10-100 кГц.

Вимірювальна комірка виготовлена з металевих дисків діаметром 150 мм з плоскопаралельними шліфованими поверхнями. Зразок відомої товщини, поміщали між пластинами, утворюючи таким чином плоский конденсатор з круглими електродами – вимірювальну комірку, яка поміщалась в термошафу для проведення вимірювань при різних температурах. Температура у шафі змінювалась від 30 до 60℃ з кроком 10℃. Перед фіксуванням значення зразок термостатувався 1 год. Схема дослідної установки наведена на рис. 1.



1 – вимірювач RLC
2 – вимірювальна комірка-конденсатор
3 – дослідний зразок
4 – термошафа

Рис. 1. **Установка для вимірювання ємності та діелектричних характеристик**

Для розрахунку відносної діелектричної проникності використовували рівняння [12]:

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot C \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot \pi \cdot D^2}, \quad (1)$$

де C – ємність вимірювального конденсатора, *Ф*;
d – відстань між обкладинками вимірювального конденсатора, *м*;
ε_0 – електрична стала, $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ *Ф/м*;
D – діаметр конденсатора, *м*;
π – відношення довжини кола до його діаметру, $\pi = 3{,}14$.

Результати дослідження. Програмне заповнення об'єму моделі дозволяє розподілити матеріал у об'ємі та отримати зразки з різною питомою густиною. Використовуючи значення об'єму та ваги дослідного зразка розрахували значення питомої густини в залежності від ступеня програмного заповнення (рис. 2).

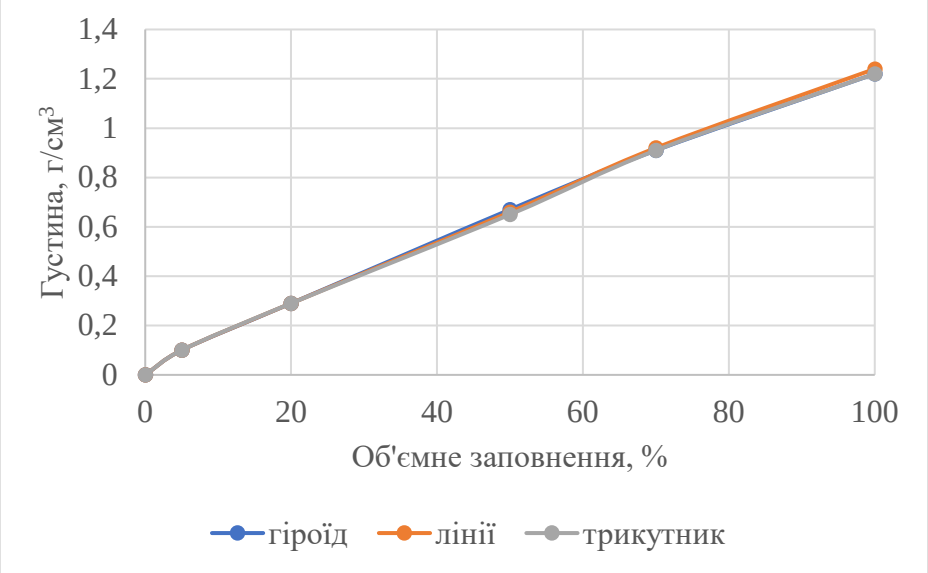
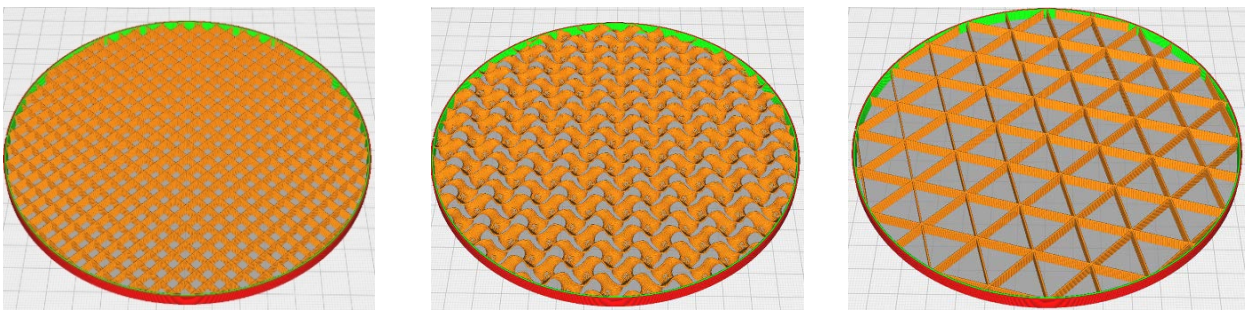


Рис. 2. **Залежність густини дослідного зразка від виду та ступеня програмного заповнення**

Залежність ступеня програмного заповнення від питомої густини має лінійний характер та не залежить від виду геометричної структури для всіх видів зразків.

Використано різні геометричні варіанти розподілу матеріалу – гіроїд, лінії та трикутник, що наявні у програмному забезпеченні Cura 5.0. (рис. 3).



а б в

Рис. 3. **Зовнішній вигляд програмного заповнення об'єму дослідних зразків згідно алгоритму: а – лінії; б – гіроїд; с – трикутник**

Заповнення лінії та трикутник відносяться до двох мірних структур, а заповнення гіроїд – до тримірних.

Для кожного ступеня заповнення розраховано еквівалентний розмір комірки. Значення розміру просторової комірки, що генерується при перетворенні моделі наведено в табл. 2.

Значення розміру комірки важливе для інтерпретації частотних характеристик зразка при вимірюванні змінним струмом. За допомогою програмного забезпечення була оцінена вага зразка, що моделюється з використанням значення густини матеріалу 1,24 г/см^3. В таблиці

3 наведено розраховане та виміряне значення зразків. Відхилення маси може бути пояснене коливаннями діаметру мононитки для 3Д друку та точністю моделювання.

Таблиця 2

Значення еквівалентного розміру комірок об'ємного заповнення дослідних зразків

Об'ємне заповнення, %	Еквівалентний розмір комірки, мм		
	Для типу об'ємного заповнення		
	Гіроїд	Лінії	Трикутники
5	12,0	24,0	36,0
10	6,0	12,0	18,0
20	3,0	6,0	9,0
50	1,2	1,2	3,6
70	0,8	0,8	2,6
100	0,6	0,6	1,8

Таблиця 3

Розраховані та виміряні значення ваги дослідних зразків

Об'ємне заповнення, %	Розрахункова/виміряна вага зразка, г		
	Гіроїд	Лінії	Трикутники
5	9/9,2	9/9,2	9/9,2
10	15/14,7	14/14,2	14/14,3
20	26/25,7	25/26,1	25/26,6
50	58/57,2	58/60,0	58/60,0
70	80/78,7	79/78,3	79/78,1
100	111/107,7	112/111,6	112/114,3

З наведених результатів прослідковується узгодженість розрахованих та виміряних значень ваги зразків при застосуванні виміряного значення густини матеріалу, дані моделювання, що генеруються програмним забезпеченням можуть бути успішно використані у практичних застосуваннях.

На рис. 4 наведено залежність виміряного значення ємності від питомої густини для різних вимірювальних частот при температурі 25°С.

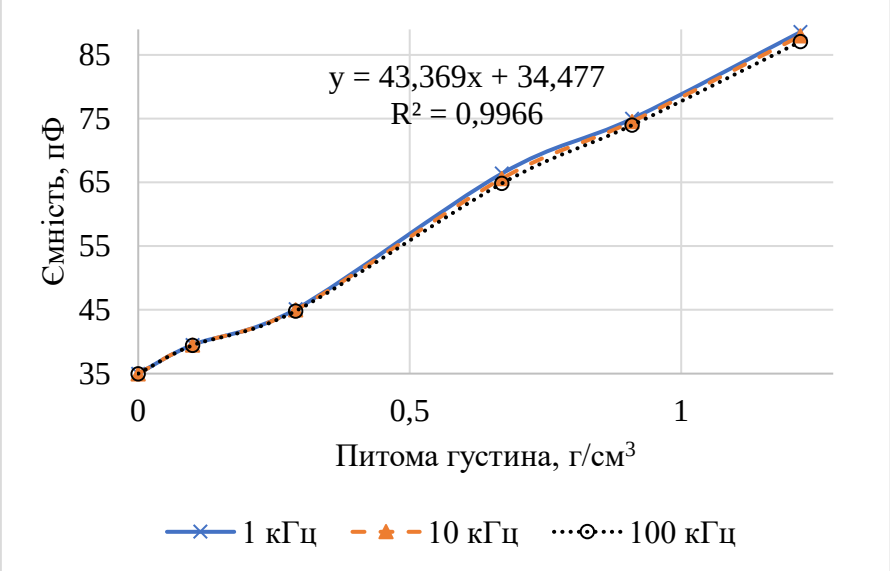
Отримані залежності мають лінійних характер, велична достовірності апроксимації 0,99. Значення ємності змінюються з частотою вимірювальної напруги та мають лінійний характер залежності від питомої густини.

Значення тангенса кута діелектричних втрат виміряне приладом, змінюється від 0,005 до 0,001 для всіх видів зразків та частот вимірювання. Для заповнення від 5 до 20 % значення становить 0,001 а для монолітного заповнення 0,005.

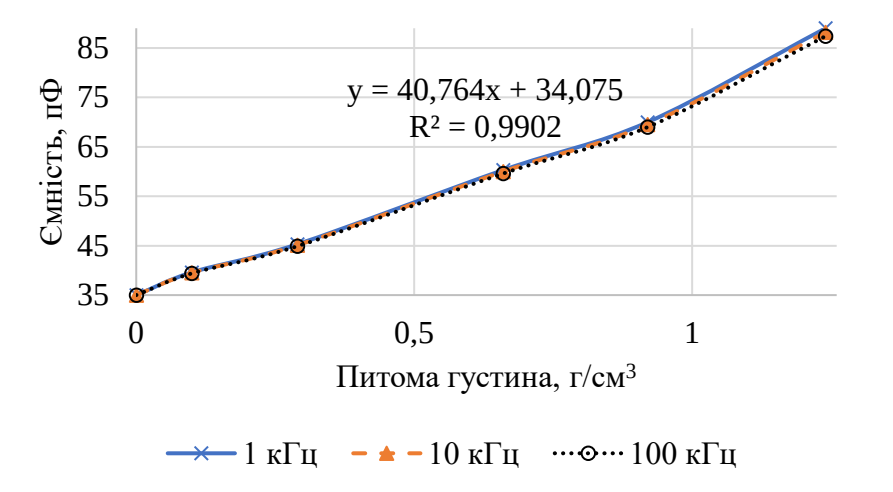
На основі даних ємності та геометричних розмірів вимірювальної комірки здійснено розрахунок відносної діелектричної проникності (ε) зразка. Значення ε для монолітних зразків збігаються з літературними даними з інженерною точністю. Слід зазначити, що технологія адитивного виробництва не завжди забезпечує монолітну структуру зразка, так як об'єм заповнюється циліндричними потоками матеріалу. Значення питомої густини монолітного зразка дещо відмінне від виміряного значення густини монолітного зразка полімеру.

На рис. 5 наведено залежність розрахованого значення відносної діелектричної проникності від питомої густини для різних вимірювальних частот при температурі 25°С.

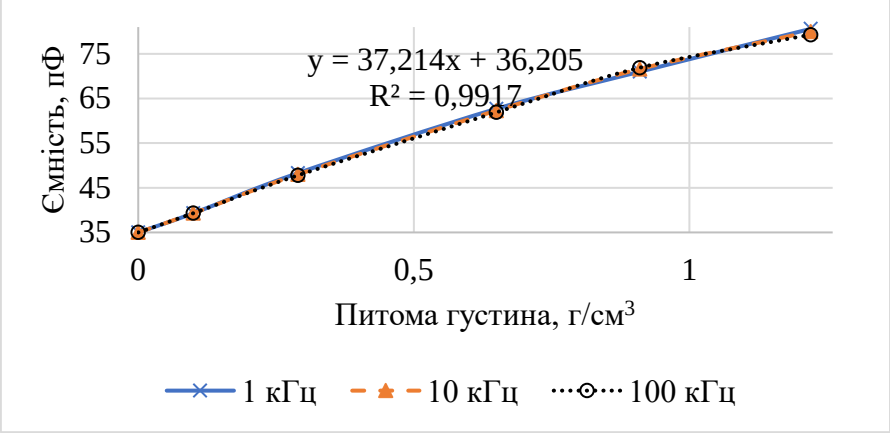
Отримані залежності мають лінійних характер з величиною достовірності апроксимації 0,99, відносна діелектрична проникність лінійно зменшується зі зниженням питомої густини.



а

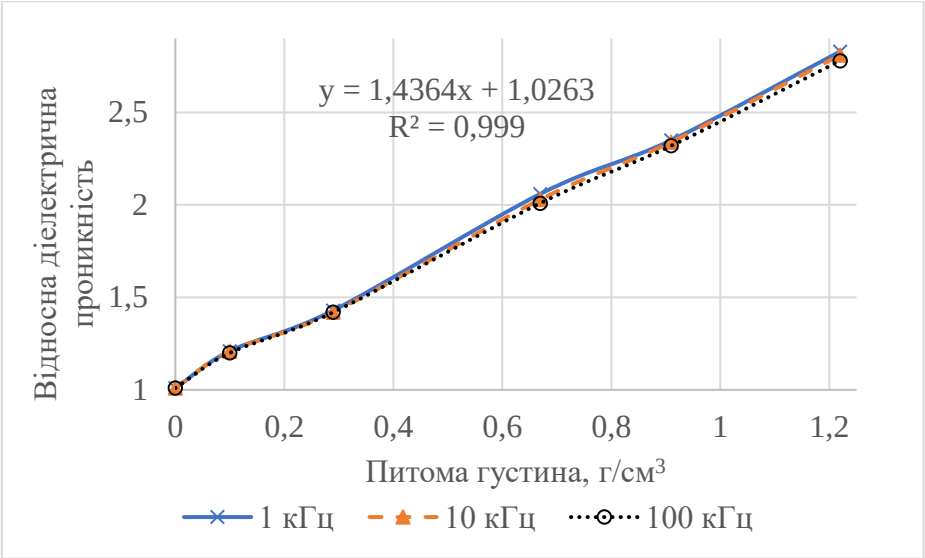


б

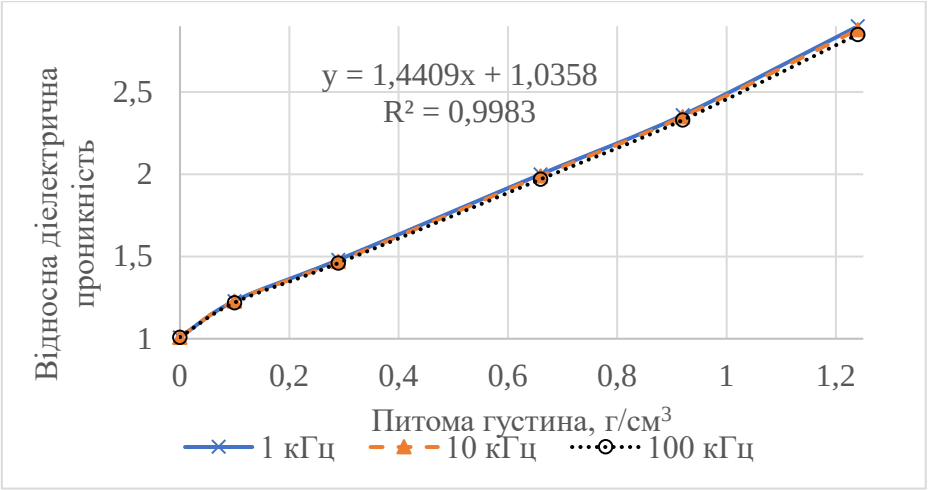


в

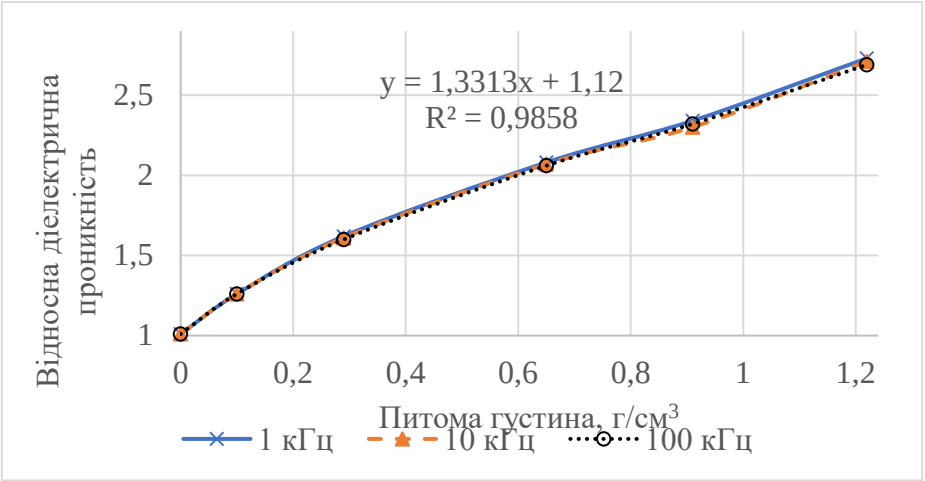
Рис. 4. **Залежність ємності зразка від питомої густини для різних частот при типі об'ємного заповнення: а – гіроїд; б – лінії; в – трикутники**



а



б



в

Рис. 5. **Залежність відносної діелектричної проникності від питомої густини при різних частотах вимірювання для типів об'ємного заповнення: а –гіроїд; б – лінії; в – трикутники**

З літературних джерел відомо, що існують теоретичні моделі, котрі дозволяють розрахувати значення відносної діелектричної проникності розподілу матеріалів у об'ємі [13]. Найбільш вживаною є модель Вінера для теорії ефективного середовища, яка на сьогоднішній день є найпоширенішою моделлю для прогнозування відносної діелектричної проникності двокомпонентних композитів, що описується залежністю:

$$\varepsilon_{max} = f \cdot \varepsilon_m + (1-f) \cdot \varepsilon_f, \quad (2)$$

де ε_{max} – відносна діелектрична проникність для суміші;
f – об'ємний вміст компонента суміші;
ε_m – відносна діелектрична проникність полімерної матриці;
ε_f – відносна діелектрична проникність наповнювача.

На рис. 6 наведено розраховані за рівнянням (2) (лінії 1–3) та розраховані за виміряними значеннями ємності (лінії 4–6) значення відносної діелектричної проникності зразків з різними типами об'ємного заповнення.

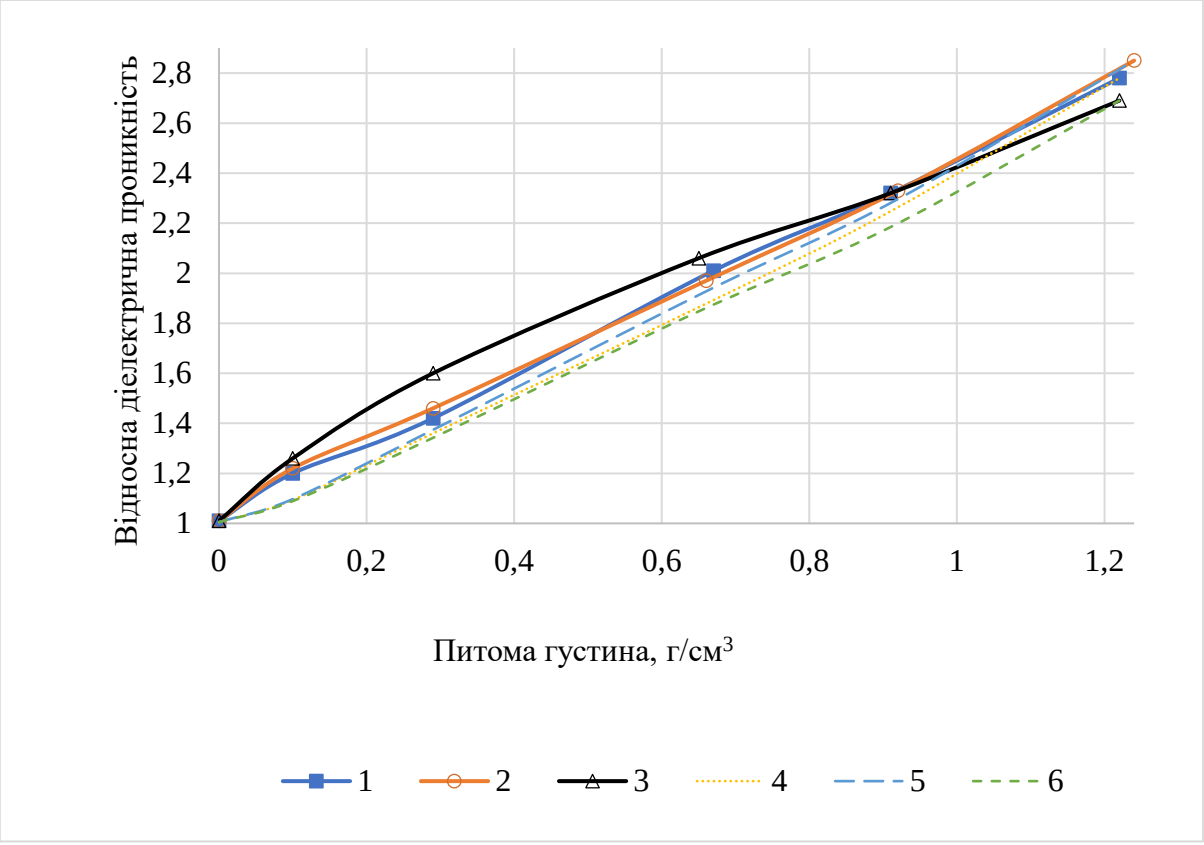


Рис. 6. **Залежність відносної діелектричної проникності від питомої густини для різних типів об'ємного заповнення при частоті 100кГц: 1- гіроїд; 2 – лінії; 3 – трикутники; 4 – гіроїд; 5 – лінії; 6 – трикутники**

Розраховані на основі вимірювань та за математичною моделлю значення відносної діелектричної проникності добре узгоджуються для всіх досліджених типів об'ємного заповнення.

Результати вимірювання відносної діелектричної проникності при підвищеній температурі наведено на рис. 7.

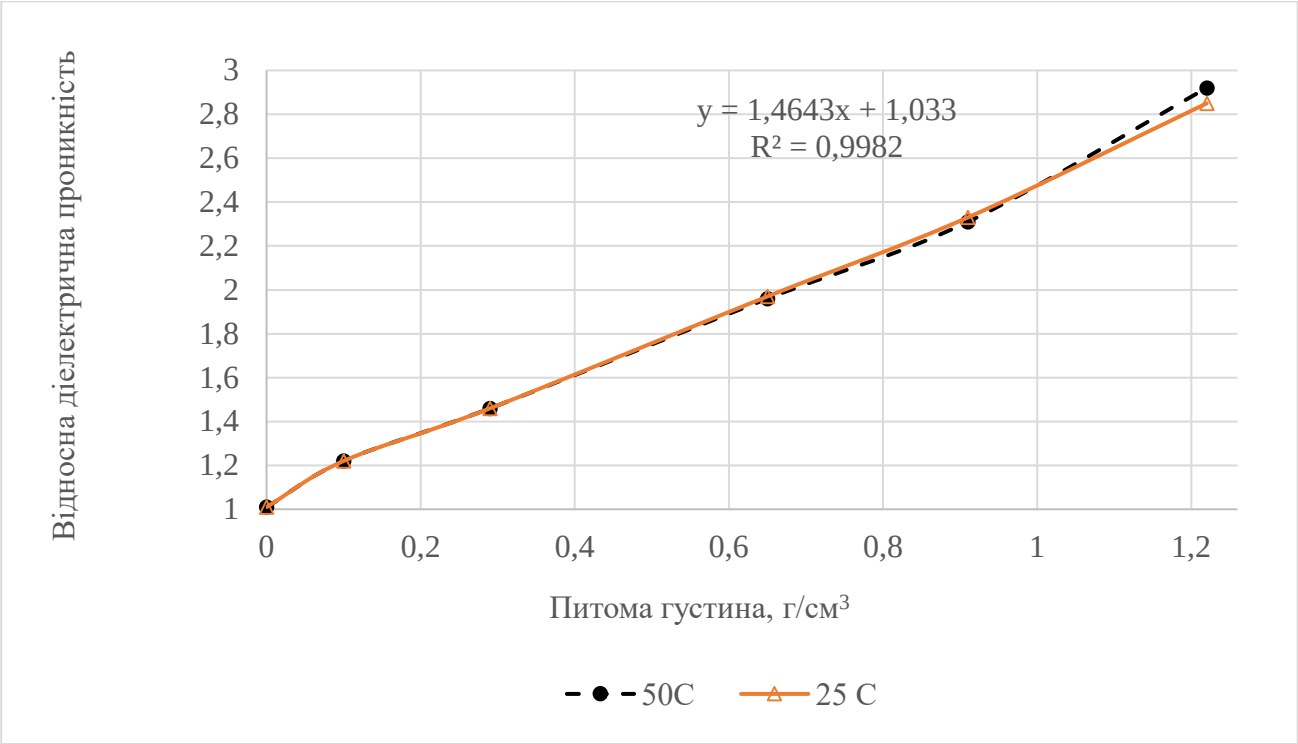


Рис. 7. **Залежність відносної діелектричної проникності від питомої густини для зразка з типом об'ємного заповнення – лінії прирізних температурах та частоті 100кГц**

Для дослідних зразків з типом об'ємного заповнення – лінії спостерігається незначна зміна відносної діелектричної проникності з температурою. Для монолітних зразків спостерігається зростання відносної діелектричної проникності з 2,85 при 25℃ до 2,95 при 50℃, що свідчить про не суттєвий вплив температури діапазону типової експлуатації виробів.

Висновки. Для виробів, створених адитивним виробництвом, питома густина лінійно залежить від об'ємного заповнення. Варіюючи об'ємне заповнення та його тип можливо регулювати густину виробу і створювати таким чином структури, що подібні до пін з програмованою структурою.

Відносна діелектрична проникність з високою достовірністю лінійно залежить від питомої густини та ступеня об'ємного заповнення. Варіювання питомої густини дозволяє з високою точністю та відтворюваністю змінювати відносну діелектричну проникність виробів.

Відносна діелектрична проникність не значною мірою залежить від частоти вимірювання ємності в діапазоні 1–100 кГц.

Вплив температури зразка в діапазоні 25–50℃ спостерігається лише для монолітно заповнених зразків полілактиду, у вигляді зростання значення відносної діелектричної проникності на 2,5% при температурі 50℃.

Значення відносної діелектричної проникності, розраховані за теоретичними моделями, збігаються з виміряними для всіх значень об'ємного заповнення.

Показано, що застосування програмного заповнення дозволяє ефективно варіювати відносну діелектричну проникність матеріалів.

Одержані дані можуть бути використані при проектуванні полімерних виробів, котрі застосовуються у радіочастотних та електронних застосуваннях.

References

1. Haque, S. M., Ardila-Rey, J. A., Umar, Y., Mas' ud, A. A., Muhammad-Sukki, F., Jume, B. H., ... & Bani, N. A. (2021). Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment. *Energies*, 14(10), 2758.
2. Kovalchuk, O. V., Kovalchuk, T. M., Harbovskyi, Yu. A., Lahoda, O. A., Svistilnik, R. F., Pushkarov, D. V., Volokh, L. V., Oleinykova, I. V. (2023). Temperature dependence of the dielectric properties of a nanocomposite material based on linear polyethylene at the beginning of the percolation transition. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics* (SPQEO), 2023, №1.
3. Hummel, R. E. (2001). Conducting Polymers and Organic Metals. *Electrical Properties of Polymers, Ceramics, Dielectrics, and Amorphous Materials* (pp. 166-193). Springer Berlin Heidelberg. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-86538-1_9.
4. Surjadi, J. U., Gao, L., Du, H., Li, X., Xiong, X., Fang, N. X., Lu, Y. (2019). Mechanical metamaterials and their engineering applications. *Advanced Engineering Materials*, 21(3), 1800864.
5. Xie, P., Shi, Z., Feng, M., Sun, K., Liu, Y., Yan, K., ... & Guo, Z. (2022). Recent advances in radio-frequency negative dielectric metamaterials by designing heterogeneous composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5(2), 679–695.
6. Iskandarov, R. Sh., Sova, N. V., Savchenko, B. M., Piatnychuk, I. I., Tataraenko, V. A. (2019). Additive formation of carbon composites based on L-polylactide [Adytyvne formuvannia vuhlekompozytiv na osnovi L-polilaktydu]. *Visnyk KNUTD. Seriia Tekhnichni nauky = Bulletin of KNUTD. Series Technical sciences*, 6, 104–111. http://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2019.6.10 [in Ukrainian].
7. Sova, N. V., Sleptsov, O. O., Fedoriv, T. R., Martynenko, A. O., Kudlai, M. R., Iskandarov, R. Sh. (2020). Vplyv parametriv adytyvnoho formuvannia na elektrychni vlastyvosti hrafitonapovnenoho kompozytu na osnovi polilaktydu [Influence of additive molding parameters on electrical properties of graphite-filled polylactide-based composite]. *Visnyk KNUTD. Seriia Tekhnichni nauky = Bulletin of KNUTD. Series Technical sciences*, 5, 93–102. http://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2020.5.9 [in Ukrainian].
8. Yang, D., Mei, H., Yao, L., Yang, W., Yao, Y., Cheng, L., ... & Dassios, K. G. (2021). 3D/4D printed tunable

Література

1. Haque S. M., Ardila-Rey J. A., Umar Y., Mas' ud A. A., Muhammad-Sukki F., Jume B. H. ... & Bani N. A. Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment. *Energies*. 2021. 14(10). 2758.
2. Kovalchuk O. V., Kovalchuk T. M., Harbovskyi Yu. A., Lahoda O. A., Svistilnik R. F., Pushkarov D. V., Volokh L. V., Oleinykova I. V. Temperature dependence of the dielectric properties of a nanocomposite material based on linear polyethylene at the beginning of the percolation transition. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics* (SPQEO). 2023. №1.
3. Hummel R. E. Conducting Polymers and Organic Metals. *Electrical Properties of Polymers, Ceramics, Dielectrics, and Amorphous Materials* (pp. 166–193). Springer Berlin Heidelberg, 2001. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-86538-1_9.
4. Surjadi J. U., Gao L., Du H., Li X., Xiong X., Fang N. X., Lu Y. Mechanical metamaterials and their engineering applications. *Advanced Engineering Materials*. 2019. 21(3). 1800864.
5. Xie P., Shi Z., Feng M., Sun K., Liu Y., Yan K., ... Guo Z. Recent advances in radio-frequency negative dielectric metamaterials by designing heterogeneous composites. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022. 5(2). P. 679–695.
6. Іскандаров Р. Ш., Сова Н. В., Савченко Б. М., П'ятничук І. І., Татараенко В. А. Адитивне формування вуглекомпозитів на основі L-полілактиду. *Вісник КНУТД. Серія Технічні науки*. 2019. № 6. С. 104–111. http://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2019.6.10.
7. Сова Н. В., Слепцов О. О., Федорів Т. Р., Мартиненко А. О., Кудлай М. Р., Іскандаров Р. Ш. Вплив параметрів адитивного формування на електричні властивості графітонаповненого композиту на основі полілактиду. *Вісник КНУТД. Серія Технічні науки*. 2020. № 5. С. 93–102. http://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2020.5.9.
8. Yang D., Mei H., Yao L., Yang W., Yao Y., Cheng L., ... Dassios K. G. 3D/4D printed tunable electrical metamaterials with more

electrical metamaterials with more sophisticated structures. *Journal of Materials Chemistry C*, 9(36), 12010–12036.
9. de Oliveira Neto, A. M., Justo, J. F., Beccaro, W., & de Oliveira, A. M. (2023). Designing and building radio frequency devices with tailored dielectric properties using additive manufacturing. *Microwave and Optical Technology Letters*, 65(3), 777–784.
10. Qiao, Y., Yin, X., Zhu, T., Li, H., Tang, C. (2018). Dielectric polymers with novel chemistry, compositions and architectures. *Progress in Polymer Science*, 80, 153–162.
11. Yang, Z., Yue, D., Yao, Y., Li, J., Chi, Q., Chen, Q., ... & Feng, Y. (2022). Energy storage application of all-organic polymer dielectrics: a review. *Polymers*, 14(6), 1160.
12. Kucheruk, I. M., Horbachuk, I. T., Lutsyk, P. P. (2001). Zahalnyi kurs fizyky u 3 t.: navch. posib. [General course of physics in 3 volumes: education. manual]. Kyiv: Tekhnika. Vol. 2. Elektryka I mahnetyzm [Electricity and magnetism]. P. 60–64 [in Ukrainian].
13. Goulas, A., Zhang, S., McGhee, J. R., Cadman, D. A., Whittow, W. G., Vardaxoglou, J. C., Engstrøm, D. S. (2020). Fused filament fabrication of functionally graded polymer composites with variable relative permittivity for microwave devices. *Materials & Design*, 193, 108871.

sophisticated structures. *Journal of Materials Chemistry C*. 2021. 9(36). P. 12010–12036.
9. de Oliveira Neto A. M., Justo J. F., Beccaro W., de Oliveira A. M. Designing and building radio frequency devices with tailored dielectric properties using additive manufacturing. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2023. 65(3). P. 777–784.
10. Qiao Y., Yin X., Zhu T., Li H., Tang C. Dielectric polymers with novel chemistry, compositions and architectures. *Progress in Polymer Science*. 2018. 80. P. 153–162.
11. Yang Z., Yue D., Yao Y., Li J., Chi Q., Chen Q., ... Feng Y. Energy storage application of all-organic polymer dielectrics: a review. *Polymers*. 2022. 14(6). 1160.
12. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики у 3 т.: навч. посіб. К.: Техніка, 2001 Т. 2. Електрика і магнетизм. С. 60–64.
13. Goulas A., Zhang S., McGhee J. R., Cadman D. A., Whittow W. G., Vardaxoglou J. C., Engstrøm D. S. Fused filament fabrication of functionally graded polymer composites with variable relative permittivity for microwave devices. *Materials & Design*. 2020. 193. 108871.

SAVCHENKO BOHDAN
Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-8636-5734
Scopus Author ID: 57212779258
E-mail: 1079@ukr.net

SOVA NADIYA
Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-3550-6135
Scopus Author ID: 56685569600
E-mail: djanc@ukr.net

KHOMENKO VOLODYMYR
Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-0013-8010
Scopus Author ID: 7004402598
E-mail: v.khomenko@i.ua

SLIEPTSOV OLEKSANDR
PhD, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-0608-1855
Scopus Author ID: 57189215952

BULHAKOV YEVHENII
Postgraduate Student, Department of Chemical Technologies and Resource Saving of the Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: Yevhenii.bulhakov97@gmail.com

SLEPCHENKO ROMAN
Student, Department of Chemical Technologies and Resource Saving, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

SAVCHENKO B. M., SOVA N. V., KHOMENKO V. G., SLIEPTSOV O. O., BULHAKOV Ye. S., SLEPCHENKO R. Yu.
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE CREATION OF METAMATERIALS WITH ADJUSTABLE DIELECTRIC PROPERTIES

Purpose. *The purpose of this article is to study the influence of the programmable infill structure of material obtained by the additive manufacturing method on their dielectric properties.*

Methodology*. The dielectric characteristics of the test samples were studied by measuring their capacitance and dielectric loss tangent using the RLC meter according to a 4-electrode scheme. The measurements were carried out using alternating current and measuring frequencies of 100 Hz, 1-10-100 kHz.*

Findings*. The relative permittivity is linearly dependent on the specific density and degree of volume filling with high reliability and varies slightly with the measurement frequency. An increase in temperature can change the value of the relative permittivity only in the case of monolithic samples by 2.5% at a temperature of 50°C. The values of the relative permittivity calculated by theoretical models coincide with the measured values for all values of the volume filling. The use of software filling makes it possible to effectively vary the relative permittivity of polylactide material.*

Originality. *It was found that the relative dielectric constant of the polylactide samples under study has a linear dependence on the degree of volume filling.*

Practical value. *It has been established that the use of software filling of prototypes during additive manufacturing allows the creation of materials with adjustable values of the relative permittivity for the creation of products for radio frequency applications.*

Keywords: *additive manufacturing; polymeric materials; programmable structures; relative permittivity.*

ISSN 2786-5371 print
ISSN 2786-538X online
Технології та інжиніринг, № 6(17), 2023

https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.8

УДК 678.679.32

СВІСТІЛЬНІК Р. Ф., ПАТЛУН Д. В.
Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ ПОКРИТТІВ

Мета дослідження. *Встановлення впливу температури на значення питомого електричного опору композитних покриттів різного складу.*

Методи дослідження: *Вимірювання поверхневого електричного опору проводилось за методом Кельвіна з використання чотирьохелектродної комірки. Вимірювання температури нагрівальної поверхні здійснювалось за допомогою резистивного датчика температури. Товщина шару композитного покриття визначалась за допомогою мікрометра.*

Результати. *Встановлено зміна значення питомого електричного опору композитних покриттів в температурному діапазоні 30–120°С. Композитні покриття з полімерними матрицями нітроцелюлоза та бакелітова смола демонструють негативний температурний коефіцієнт опору. Композитне покриття на основі полівінілбутиралю володіє позитивним коефіцієнтом опору, що свідчить про придатність такої системи для застосування у нагрівальних елементах.*

Виявлено вплив залишкової вологи на властивості композитних покриттів на основі полівінілбутиралю та бакелітової смоли. Спостерігається значне зростання опору та вивільнення низькомолекулярних сполук, що зумовлює необхідність попередньої термічної обробки покриттів перед його застосуванням.

Вплив полімерної матриці на значення питомого електричного опору є суттєвим. Найнижче значення питомого спору спостерігається у композиції на основі нітроцелюлози. Найвищі значення виявлені у композиціях на основі бакелітової смоли та суміші бакелітової смоли та полівінілбутиралю.

Наукова новизна. *Встановлено вплив температури на електричні характеристики електропровідних покриттів та значення температурних коефіцієнтів опору.*

Практична значимість. *Встановлено вплив циклічного нагрівання та необхідності попередньої термічної обробки зразків перед застосуванням.*

Ключові слова: *температурний коефіцієнт опору; електропровідний наповнювач; електропровідні полімерні покриття; сажа; графіт.*

Вступ. В епоху стрімкого розвитку науки та техніки, електропровідні полімерні композитні покриття займають особливе місце серед інноваційних матеріалів, які відкривають нові можливості в електроніці, автомобільній промисловості, аерокосмічній галузі та багатьох інших сферах [1, 2]. Однак, їх функціональні властивості, зокрема електропровідність, можуть змінюватися під впливом різних зовнішніх чинників, серед яких температура відіграє ключову роль. Розуміння взаємозв'язку між температурою та електропровідністю цих матеріалів є важливим для їх ефективного використання та дальшого вдосконалення [3–5]. У [6, 7] роботі розглянуто основні механізми, які визначають вплив температурних змін на електропровідність полімерних композитних покриттів та розкрито практичне значення цих експериментів.

Електрична провідність полімерних композитів, що складаються з діелектричної матриці та електропровідного наповнювача, може бути пояснена за допомогою перколяційної теорії. Згідно котрої електричні заряди переміщуються через контактні ланцюжки частинок електропровідного наповнювача. Кількість контактних ланцюгів на одиницю об’єму або площі визначає значення електричного опору композитного матеріалу. Температура може суттєво впливати на перколяційні ланцюжки через різноманітні механізми. Найбільш вагомим фактором є теплове розширення як матриці та і композитного наповнювача.

Температура може впливати на електропровідність полімерних композитних покриттів різними способами [8–10]. З підвищенням температури мобільність полімерних ланцюгів

зростає, що може впливати на електропровідність. Температурні зміни можуть впливати на взаємодію між провідними наповнювачами, зокрема контакт між частками, що може змінювати особливості формування перколяційних шляхів провідності. На певних температурах може відбутися активація носіїв заряду, що підвищує електропровідність.

Деякі полімери мають фазові переходи (наприклад, склування) при певних температурах, що може раптово змінити їхню електропровідність. Ці процеси можуть викликати зміни у властивостях матеріалу, зокрема при підвищеній температурі, коли активізуються молекулярні рухи та реакції між компонентами. З підвищенням температури полімери та їх композити розширюються, що може вплинути на об'ємну фракцію провідних наповнювачів та, відповідно, на електропровідність.

Значення температурного коефіцієнту опору необхідне для розрахунку потужності електричних нагрівачів, а також для точного вимірювання електричного опору при певному значенні температури.

Постановка завдання. Встановити вплив температури на значення питомого електричного опору композитних покриттів різного складу.

Вихідні матеріали та методи. Для досліджень було використано електропровідні полімерні покриття, що містили суміш наповнювачів – колоїдний графітовий препарат марки С-0 (ТОВ «Завалівський графіт») та електропровідна сажу марки XC 72 Cabot Corporation.

Дані системи досліджено у попередніх роботах [11]. Дослідження впливу температури на електричні властивості є необхідним кроком при застосуванні композитних покриттів у нагрівальних елементах, а також для здійснення корегування результатів вимірювання опору при різних температурах.

Як полімерні матриці використовували полівінілбутираль (ПВБ) марки SDW-3A, бакелітову смолу (БС) (фенол формальдегідна смола резольного типу) марки СФ-0112, нітроцелюлозу (НЦ) марки А-400.

Виходячи з попередніх проведених досліджень було обрано успішну композицію з 30% мас. вмістом полімерної матриці та електропровідних наповнювачів – графіту – 60% мас. та сажі 10% мас. [11]. З даної композиція була виготовлена серія композитних покриттів з різними полімерними матрицями та однаковим вмістом та складом композитного наповнювача. Рецептурний склад досліджуваних композицій наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Рецептурний склад досліджуваних полімерних композицій

№ композиції	Вміст компонентів, % мас.				
	Полімерна матриця			Наповнювач	
	ПВБ	БС	НЦ	Графіт	Сажа
1	30	-	-	60	10
2	25	5	-	60	10
3	20	10	-	60	10
4	-	30	-	60	10
5	-	-	30	60	10

Технологія отримання розчинів електропровідних полімерних композитів (фарб) та формування з них покриттів на поверхні субстратів детально описані в статті [11]. У якості субстрату на якому формувалося покриття використовували полімерну плівку з поліетилентерефталату, з товщиною 200 мікрон. Покриття наносили за допомогою регульованого ракельного аплікатора, котрий переміщували на поверхні субстрату зі стабільною швидкістю 50 мм/хв. Покриття висушували протягом 24 год при температурі 25°С та відносній вологості 75%.

Дослідження впливу температури на електричні властивості покриттів здійснювали у комірці для вимірювання опору, що оснащувалася нагрівальним столиком та блоком регулювання температури на основі регулятора температури Yamatake sdc15. Нагрів здійснювали вид кімнатної температури до 120℃ з кроком 5℃. Зразок нагрівали у комірці до заданої температури та витримували на протязі 10 хв для стабілізації значення температури, після чого вимірювальну частину опускали на зразок та фіксували значення опору.

Значення температурного коефіцієнта розраховували за формулою [12]:

$$\alpha = \frac{1}{R1}\ \frac{\Delta R}{\Delta T}, \quad (1)$$

де α – температурний коефіцієнт опору; R – опір провідника при початковій температурі; ΔR – зміна опору; ΔT – зміна температури.

Вимірювання електричного опору здійснювали за 4-х електродною схемою з використанням омметра RS PRO RM-804.

На рис. 1 зображено вимірювальний стенд для визначення залежності питомого електричного опору дослідних зразків від температури.

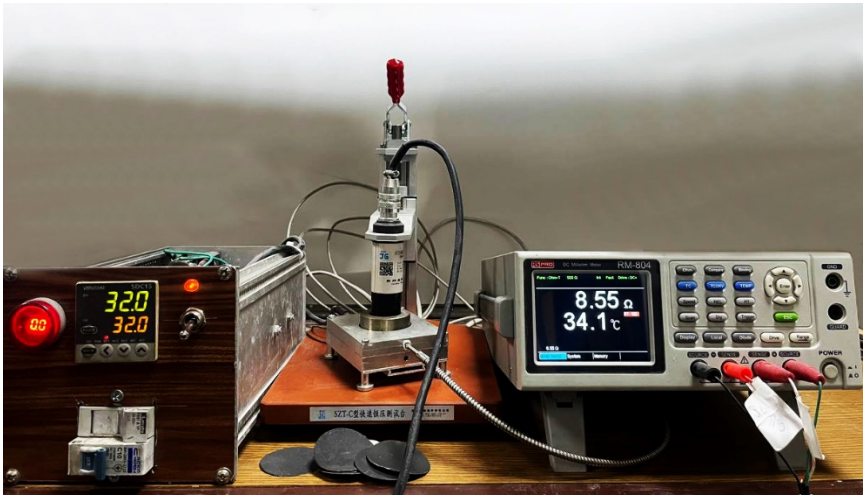


Рис. 1. **Зовнішній вигляд вимірювального стенду для визначення залежності питомого електричного опору від температури**

Результати досліджень. Дослідження температурної залежності питомого електричного опору наведені на (рис. 2–7). Вимірювання здійснювались як в процесі нагрівання так і в процесі охолодження. В процесі пошукових досліджень було встановлено, що питомий електричний опір дослідних зразків змінюється в процесі здійснення циклів нагріву охолодження.

Для композиції №1 (рис. 2) під час першого нагрівання спостерігається збільшення питомого електричного опору, а при охолодженні опір зменшується в незначній мірі. При наступних нагріваннях і охолодженнях спостерігається незначне зростання та падіння опору. Різке зростання опору при першому нагріванні ймовірно пов’язано з випаровуванням летких сполук можливо вологи або складових розчинника. Іншою ймовірною причиною явища, що спостерігається є протікання хімічних процесів у полімерній матриці (структурування або деструкції).

Під час першого та другого нагрівання зразка №1 (рис. 2) спостерігається зростання питомого електричного опору з ростом температури, що свідчить про позитивний температурний коефіцієнт. Під час наступного циклічного прогрівання зразка №1, спостерігається незначне падіння опору на 5%. Подібна зміна впливу температури можливо

пов'язана з протіканням процесів структурування полімерної матриці. Вимірювання маси зразків під час здійснення циклів нагріву охолодження виявило зменшення маси зразка під час першого циклу нагрівання, що свідчить про випаровування летких компонентів з композитного покриття.

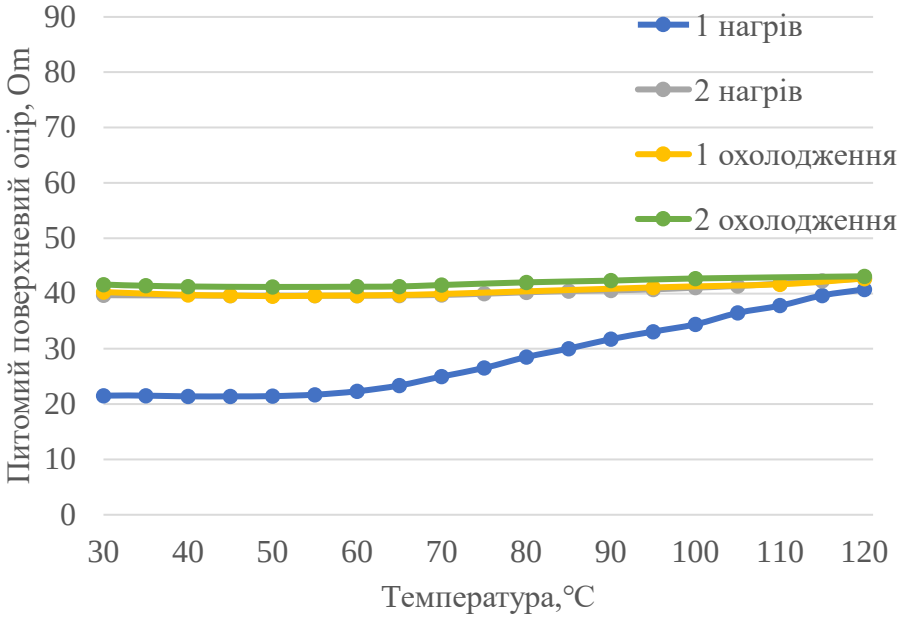


Рис. 2. **Залежність питомого поверхневого електричного опору від температури для композиції №1**

Леткі компоненти можливо потрапили в композитне покриття з розчинника (ізопропіловий спирт) або з атмосфери (волога). Поглинання або наявність летких компонентів у складі композитного покриття призводить до його набухання, а нагрівання покриття призводить до випаровування летких компонентів та подальшої усадки зразка. Чергування набухання та усадки може мати вплив на перколяцію електропровідного наповнювача у складі композитного покриття. Здійснення циклічного нагріву-охолодження з тривалою витримкою зразків у кімнатних умовах (відносна вологість 75% і температура 25°С) не призвело до повторення характеру зміни опору, котрий спостерігався під час першого прогріву зразка №1. Поглинання вологи з атмосфери можна вважати малоймовірним.

Було визначено ваговим методом, що ізопропіловий спирт який був використаний у якості розчинника для приготування композитних покриттів, містить вологу у кількості 2,5%. З літературних даних відома здатність ПВБ розчинятись в спиртово-водних сумішах [13].

Найбільш ймовірною причиною дослідженої поведінки є присутність та вплив вологи у ПВБ матриці. Вода, що міститься в розчиннику проникнула в композитне покриття і утримувалась там у зв'язаному вигляді.

При застосуванні ПВБ матриці у композитних покриттях для нагрівальних елементів слід враховувати взаємодію матриці з вологою та здійснювати термічну обробку покриття перед застосуванням.

Для композиції №2 (рис. 3) спостерігаються схожі властивості, як і для композиції №1 (рис. 2), але відмінність полягає в тому, що спостерігається незначне падіння питомого поверхневого електричного опору при другому та третьому циклі нагрівання та охолодження в межах 5–10%, що ймовірно повзано з впливом БС. Більш повільне збільшення питомого поверхневого електричного опору при першому циклі нагрівання та охолодження, хоча в кінцевій точці питомий поверхневий електричний опір збільшується значно та досягає 130%.

Для композиції №3 (рис. 4) спостерігаються схожі властивості як і для композиції №1 (рис. 2), але відмінність полягає в тому, що питомий поверхневий електричний опір більш повільно збільшується при першому циклі нагрівання та охолодження починаючи з 80°С ймовірно завдяки додаванню 10% БС, що заважає зростанню опору при вищих температурах. Хоча кінцева точка нагріву збільшує показник питомого поверхневого опору в 2 рази для композицій №1–3. Різниця тільки в більш значному падінні питомого поверхневого електричного опору при другому та третьому циклах нагріву-охолодженню в межах 10–15%.

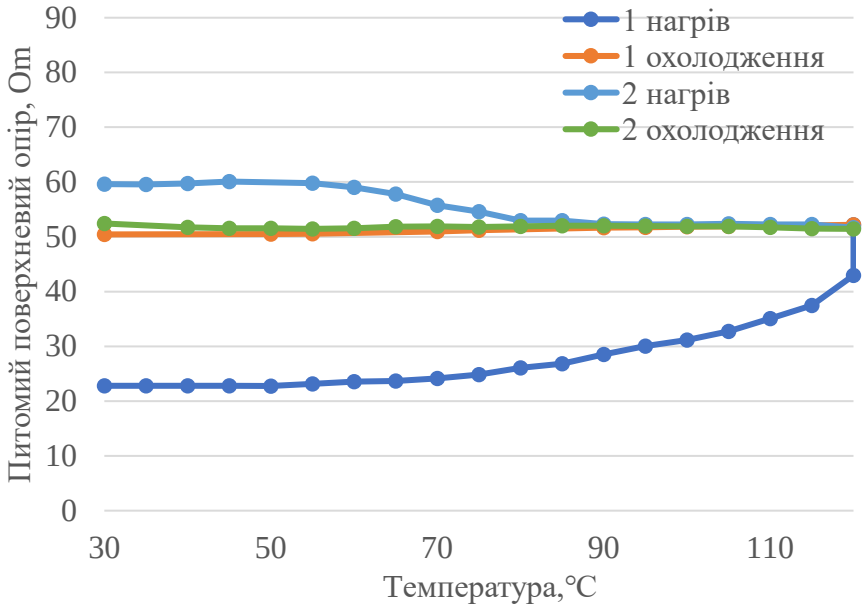


Рис. 3. **Залежність питомого поверхневого електричного опору від температури для композиції №2**

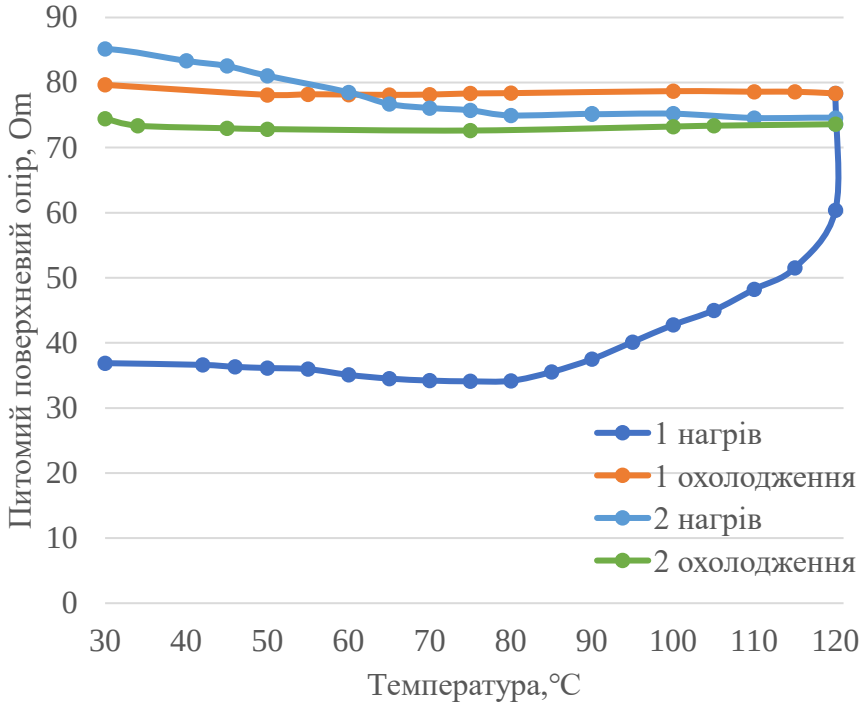


Рис. 4. **Залежність питомого поверхневого електричного опору від температури для композиції №3**

Для зразка №4 (рис. 5), який містить полімерну матрицю БС, спостерігається несуттєве зростання питомого поверхневого електричного опору після першого циклу нагріву-охолодження – близько 20%, що вказує на менш виражений впливі вологи на полімерну матрицю. Питомий поверхневий електричний опір почав зростати тільки після 100°С. При наступних циклах нагрівання та охолодження питомий поверхневий електричний опір знизився на 15%. При підвищенні температури при наступних циклах нагрівання та охолодження спостерігається зниження питомого поверхневого електричного опору. Після нагрівання зразка до 120°С питомий поверхневий електричний опір продовжив подальше зниження.

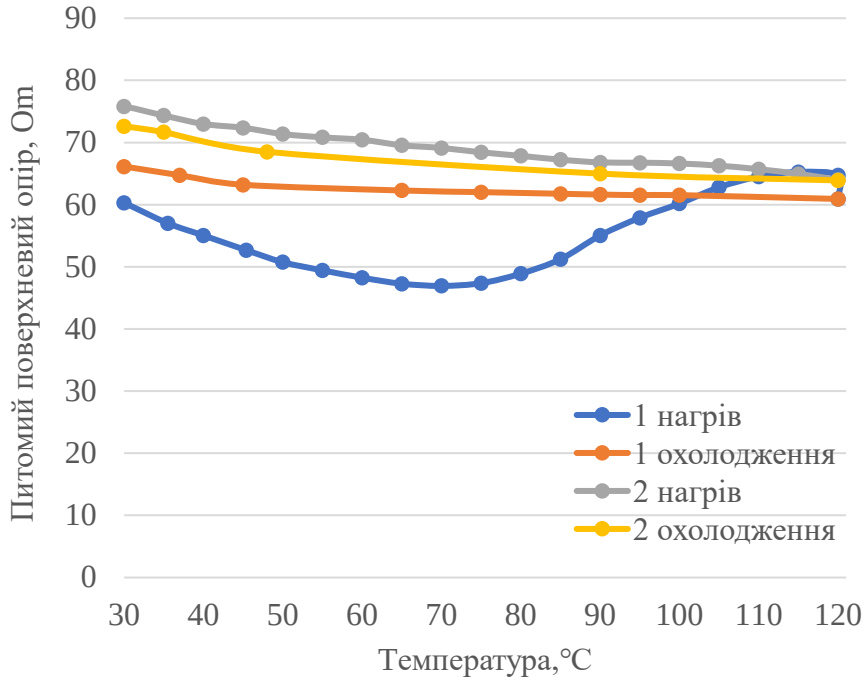


Рис. 5. **Залежність питомого поверхневого електричного опору від температури для композиції №4**

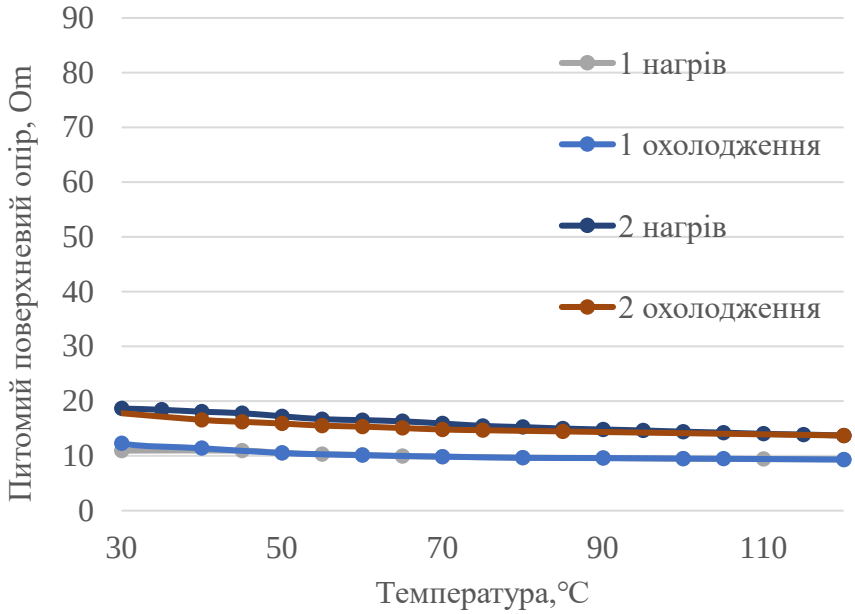


Рис. 6. **Залежність питомого поверхневого електричного опору від температури для композиції №5**

Для зразка №5 (рис. 6) який містить полімерну матрицю НЦ, спостерігається незначне зменшення питомого електричного опору зі збільшення температури та відсутність відмінностей в першому та другому циклах нагрівання–охолодження. Дана композиція демонструє найнижче значення питомого електричного опору серед розглянутих, що ймовірно пов'язане з високою полярністю нітрогруп.

Дані розрахунку температурного коефіцієнту опору здійснено за даними другого циклу нагрівання представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Температурний коефіцієнт опору досліджуваних зразків

№ композиції	Значення температурного коефіцієнту опору, $°C^{-1}$
1	0,000957
2	-0,001518
3	-0,001509
4	-0,001744
5	-0,002928

З розглянутих композицій лише композиція №1 володіє позитивним температурним коефіцієнтом, а всі інші негативним.

Висновки. Досліджено вплив циклічного нагрівання та охолодження на електричні властивості композитних покриттів. Виявлено вплив залишкової вологи на властивості композитних покриттів на основі полівінілбутиралю та бакелітової смоли. Спостерігається значне зростання опору та вивільнення низькомолекулярних сполук, що зумовлює необхідність попередньої термічної обробки покриттів перед його застосуванням.

Для композитного покриття на основі нітроцелюлози дана властивість не спостерігається.

Встановлено зміна значення питомого електричного опору композитних покриттів в температурному діапазоні 30 – 120оС. Композитні покриття з полімерними матрицями нітроцелюлоза та бакелітова смола демонструють негативний температурний коефіцієнт опору. Композитне покриття на основі полівінілбутиралю володіє позитивним коефіцієнтом опору, що свідчить про придатність такої системи для застосування у нагрівальних елементах.

Вплив полімерної матриці на значення питомого електричного опору є суттєвим. Найнижче значення питомого опору спостерігається у композиції на основі нітроцелюлози. Найвищі значення виявлені у композиціях на основі бакелітової смоли та суміші бакелітової смоли та полівінілбутиралю.

References

1. Zhang, W., Dehghani-Sanij, A. A., Blackburn, R. S. (2007). Carbon based conductive polymer composites. *Journal of materials science*, 42, 3408–3418.

2. Radzuan, N. A. M., Sulong, A. B., Sahari, J. (2017). A review of electrical conductivity models for conductive polymer composite. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(14), 9262–9273.

3. Király, A., Ronkay, F. (2015). Temperature dependence of electrical properties in conductive polymer composites. *Polymer testing*, 43, 154–162.

Література

1. Zhang W., Dehghani-Sanij A. A., Blackburn R. S. Carbon based conductive polymer composites. *Journal of materials science.* 2007. Vol. 42. P. 3408–3418.

2. Radzuan N. A. M., Sulong A. B., Sahari J. A review of electrical conductivity models for conductive polymer composite. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, Iss. 14. P. 9262–9273.

3. Király A., Ronkay F. Temperature dependence of electrical properties in conductive polymer composites. *Polymer testing.* 2015. Vol. 43. P. 154–162.

4. Xiao, Z., Guo, R., He, X., Gan, Y., Zhang, J., Huang, H., ... Xia, Y. (2022). Polybenzimidazole/Conductive Carbon Black Composite Driven at Low Voltage for High-Temperature Heaters. *Journal of Electronic Materials*, 51(5), 2652–2662.

5. Setnescu, R., Lungulescu, M., Bara, A., Caramitu, A., Mitrea, S., Marinescu, V., Culicov, O. A. (2019). Thermo-Oxidative Behavior of Carbon Black Composites for Self-Regulating Heaters. *Advanced Engineering Forum*, November, Vol. 34, P. 66–80.

6. Nagel, J., Hanemann, T., Rapp, B. E., Finnah, G. (2022). Enhanced PTC effect in polyamide/carbon black composites. *Materials*, 15(15), 5400.

7. Ali, I., AlGarni, T. S., Shchegolkov, A., Shchegolkov, A., Jang, S. H., Galunin, E., ... Imanova, G. T. (2021). Temperature self-regulating flat electric heaters based on MWCNTs-modified polymers. *Polymer Bulletin*, 78, 6689–6703.

8. Hindermann-Bischoff, M., Ehrburger-Dolle, F. (2001). Electrical conductivity of carbon black–polyethylene composites: Experimental evidence of the change of cluster connectivity in the PTC effect. *Carbon*, 39(3), 375–382. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622300001305.

9. Rahaman, M., Chaki, T. K., Khastgir, D. (2013). Control of the temperature coefficient of the DC resistivity in polymer-based composites. *Journal of Materials Science*, 48, 7466–7475. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-013-7561-9.

10. Shafiei, M., Ghasemi, I., Gomari, S., Abedini, A., Jamjah, R. (2021). Positive Temperature Coefficient and Electrical Conductivity Investigation of Hybrid Nanocomposites Based on High-Density Polyethylene/Graphene Nanoplatelets/Carbon Black. *physica status solidi (a)*, 218(20), 2100361. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pssa.202100361

11. Svistilnik, R. F., Fedoriv, T. R., Savchenko, B. M., Osaulenko, S. I. (2022). Rozrobka tekhnolohiyi elektrprovidnikh gibridnikh kompozitsiynykh pokryttiv [Development technology of electrically conductive hybrid composite coatings]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh = Technologies and Engineering*, 4(9), 60–70. URL: http://jrnl.knutd.edu.ua/index.php/techeng/article/view/1158.

12. Malvino, A. P., Bates, D. J., Hoppe, P. E. (1993). Electronic principles. Glencoe.

4. Xiao Z., Guo R., He X., Gan Y., Zhang J., Huang H., ... Xia Y. Polybenzimidazole/ Conductive Carbon Black Composite Driven at Low Voltage for High-Temperature Heaters. *Journal of Electronic Materials.* 2022. Vol. 51, Iss. 5. P. 2652–2662.

5. Setnescu R., Lungulescu M., Bara A., Caramitu A., Mitrea S., Marinescu V., Culicov O. A. Thermo-Oxidative Behavior of Carbon Black Composites for Self-Regulating Heaters. *Advanced Engineering Forum.* 2019. Vol. 34. P. 66–80.

6. Nagel J., Hanemann T., Rapp B. E., Finnah G. Enhanced PTC effect in polyamide/carbon black composites. *Materials.* 2022. No. 15(15). Art. 5400.

7. Ali I., AlGarni T. S., Shchegolkov A., Shchegolkov A., Jang S. H., Galunin E., ... Imanova G. T. Temperature self-regulating flat electric heaters based on MWCNTs-modified polymers. *Polymer Bulletin.* 2021. Vol. 78. P. 6689–6703.

8. Hindermann-Bischoff M., Ehrburger-Dolle F. Electrical conductivity of carbon black–polyethylene composites: Experimental evidence of the change of cluster connectivity in the PTC effect. *Carbon.* 2001. Vol. 39, Iss. 3. P. 375–382. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622300001305.

9. Rahaman M., Chaki T. K., Khastgir D. Control of the temperature coefficient of the DC resistivity in polymer-based composites. *Journal of Materials Science*. 2013. Vol. 48. P. 7466–7475. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-013-7561-9.

10. Shafiei M., Ghasemi I., Gomari S., Abedini A., Jamjah R. Positive Temperature Coefficient and Electrical Conductivity Investigation of Hybrid Nanocomposites Based on High-Density Polyethylene/ Graphene Nanoplatelets/Carbon Black. *physica status solidi (a).* 2021. Vol. 218, Iss. 20. Art. 2100361. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pssa.202100361.

11. Свістільнік Р. Ф., Федорів Т. Р., Савченко Б. М., Осауленко С. І. Розробка технології електропровідних гібридних композиційних покриттів. *Технології та інжиніринг*. 2022. № 4(9). С. 60–70. URL: http://jrnl.knutd.edu.ua/index.php/techeng/article/view/1158.

12. Malvino A. P., Bates D. J., Hoppe P. E. Electronic principles. Glencoe, 1993.

13. Carrot, C., Bendaoud, A., Pillon, C., Olabisi, O., Adewale, K. (2016). Polyvinyl butyral. *Handbook of thermoplastics*, 2, 89–137. URL: https://www.google.com/books?hl=uk&lr=&id=kjg0CwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA89&dq=polyvinyl+butyral&ots=pVW_4cX7LJ&sig=ZVdLd1B4Dl6RFB6WEsfDj1snZ80.

13. Carrot C., Bendaoud A., Pillon C., Olabisi O., Adewale K. Polyvinyl butyral. *Handbook of thermoplastics.* 2016. No. 2. P. 89–137. URL: https://www.google.com/books?hl=uk&lr=&id=kjg0CwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA89&dq=polyvinyl+butyral&ots=pVW_4cX7LJ&sig=ZVdLd1B4Dl6RFB6WEsfDj1snZ80.

SVISTSILNIK ROMAN
Postgraduate student,
Department of Chemical Technologies and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: romchigo@gmail.com

DMYTRO PATLUN
Postgraduate student,
Department of Chemical Technologies and Resource Saving,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: dimapatlun@gmail.com

SVISTSILNIK R. F., PATLUN D. V.
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

STUDY OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE CONDUCTIVE PROPERTIES OF POLYMERIC COMPOSITE COATINGS

Purpose. *Determination of the effect of temperature on the resistivity of composite coatings with different composition.*

Methodology. *The surface electrical resistance was measured using the Kelvin method with a four-electrode cell. The temperature of the heating surface was measured using a resistive temperature sensor. The thickness of the composite coating layer was determined using a micrometer.*

Findings. *The change in the value of the electrical resistivity of composite coatings in the temperature range of 30–120 °C was determined. The composite coatings with polymer matrices of nitrocellulose and bakelite resin show a negative temperature coefficient of resistance. The composite coating based on polyvinyl butyral has a positive coefficient of resistance, which indicates the suitability of such a system for use in heating elements.*

The influence of residual moisture on the properties of composite coatings based on polyvinyl butyral and bakelite resin was revealed. A significant increase in resistance and the release of low molecular weight compounds is observed, which necessitates preliminary heat treatment of the coatings before its use.

The influence of the polymer matrix on the resistivity value is significant. The lowest value of resistivity is observed in the composition based on nitrocellulose. The highest values were found in compositions based on bakelite resin and a mixture of bakelite resin and polyvinyl butyral.

Originality. *The influence of temperature on the electrical characteristics of conductive coatings and the value of temperature coefficients of resistance was determined.*

Practical value. *The influence of cyclic heating and the need for preliminary heat treatment of samples before use have been determined.*

Keywords*: temperature coefficient of resistance; conductive filler; conductive polymer coatings; soot; graphite.*

https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.6.9

УДК 615.074:
616.72-002.78

[1]ТАРАСЕНКО Г. В., [1]ГУРКОВСЬКА О. В., [2]БАУЛА О. П., [1]САЛІЙ О. О.
[1]Київський національний університет технологій та дизайну, Україна
[2]Міжнародне агентство професійних кваліфікацій, Україна

ОЦІНКА ЕКВІВАЛЕНТНОСТІ *IN VITRO* ГЕНЕРИЧНОГО ЛІКАРСЬКОГО НА ОСНОВІ АЛОПУРІНОЛУ У ФОРМІ ТАБЛЕТОК

Мета. *Вивчення кінетики розчинення твердої дозованої лікарської форми препарату на основі алопуринолу для оцінки його еквівалентності в умовах* in vitro *генеричного лікарського засобу у формі таблеток, порівняння фактору подібності профілів розчинення для оцінки еквівалентності генеричного препарату.*

Методика. *Досліджено фармацевтично еквівалентні препарат-генерик Алопуринол, таблетки по 100 мг, і референтний препарат Зілорик®, таблетки по 100 мг, фірми «Aspen Pharma GmbH», Німеччина. Аналітичні дослідження проводили методом адсорбційної спектрофотометрії на спектрофотометрі UV-1700 фірми «SHIMADZU» (Японія) та на приладі для розчинення твердих дозованих форм VK 7000 з нагрівачем VK750D (Vankel, США), також використовували аналітичні ваги BP 221S фірми «Sartorius» (Швейцарія), pH метр ADWA AD8000 (Угорщина). Вивчення кінетики розчинення проводили відповідно до вимог ДФУ 2.9.3 «Тест «Розчинення» для твердих дозованих форм», Настанови з дослідження біодоступності та біоеквівалентності, а також Керівництва ВООЗ в трьох буферних середовищах при значеннях pH: pH 1,2 (розчині хлористоводневої кислоти), pH 4,5 (ацетатний буферний розчин) та pH 6,8 (фосфатний буферний розчин). Буферні розчини готували згідно ДФУ (2.9.3). Умови проведення кінетики розчинення: прилад «Vankel VK 7000» із лопаттю; швидкість обертання лопаті – 50 об/хв; об'єм середовища розчинення – 900 мл; температура середовища розчинення – 37+1 ^{0}C. Відбір проб проводили через 10, 15, 20, 30 і 45 хв. ручним способом з використанням піпетки об'ємом 5 мл з ділянки посередині між поверхнею середовища розчинення і лопаттю на відстані 1 см від стінки ємкості для розчинення, а потім отримані проби фільтрували крізь шприцевий фільтр «Agilent» (0,45 мкм). Після відбору проб відібраний об'єм компенсували відповідним середовищем розчинення та контролювали pH буферних розчинів. Статистичну обробку результатів проводили з використанням програми Microsoft Office Excel з достовірністю P=95%, а для отримання статистично достовірних результатів визначення проводили на 12 зразках кожного з об'єктів дослідження.*

Результати. *Проведено оцінку еквівалентності генеричного лікарського засобу на основі алопуріналу 100 мг у формі таблеток шляхом вивчення кінетики розчинення за процедурою біовейвер відповідно до вимог Настанови СТ-Н МОЗУ 42-7.4:2022 «Лікарські засоби. Дослідження біоеквівалентності» та рекомендацій ВООЗ. Встановлено, що в середовищі з pH 1,2 (хлористоводнева кислота) вивільнення діючої речовини із досліджуваного препарату за 15 хв. становило 94,37%, а в середивищі з pH 4,5 (ацетатний буферний розчин) та з pH 6,8 (фосфатний буферний розчин) вивільнення діючої речовини становило 64,66% та 84,17% відповідно, отже, кінетичні криві розчинення (профілі розчинення) генеричного та референтного препаратів в досліджуваних середовищах подібні, а лікарські засоби є «швидкорозчинними». Фактори подібності профілів розчинення генеричного препарату при pH 1,2; 4,5 та 6,8 становили 61,12, 58,25 та 91,07 – відповідно, що дозволило підтвердити подібність профілей розчинення до референтного препарату оскільки фактору подібності $f_2 > 50$.*

Наукова новизна. *Вперше проведено оцінку еквівалентності in vitro генеричного лікарського засобу на основі алопуріналу у формі таблеток та підтверджено подібність профілів розчинення за процедурою біовейвер.*

Практична значимість. *Еквівалентність генеричного та референтного препаратів на основі алопуринолу підтверджено шляхом вивчення кінетики вивільнення діючої речовини та порівняння подібності профілів генеричного та референтного препаратів in vitro. Отримані результати дозволяють підтвердити еквівалентність досліджуваних препаратів без проведення досліджень біоеквівалентності in vivo.*

Ключові слова: *алопуринол; біовейвер; кінетика розчинення;* in vitro*; метод адсорбційної спектрофотометрії; таблетки.*

Вступ. Щороку захворюваність населення світу на подагру неухильно зростає. Серед населення країн Європи на подагру хворіють близько 3%, в США – кількість хворих становить близько 5%, а на гіперурикемію – близько 20%. В Україні поширеність захворювання на сольові артропатії залишається на високому рівні протягом останніх років – близько 3% дорослого населення, переважно з яких є чоловіки після 30 років, проте як жінки на подагру чи гіперурикемію страждають значно рідше – до 8% від усіх випадків подагри. Фармацевтична розробка якісних, безпечних та ефективних генеричних лікарських засобів для лікування подагри вітчизняного виробництва з метою для задоволення потреб пацієнтів і розширення асортименту препаратів на фармацевтичного ринку є важливою та актуальною.

Алопуринол є препаратом для зниження концентрації сечової кислоти, і зазвичай призначається для лікування хронічної подагри або гіперурикемії, пов'язаної з лейкемією, променевою терапією та протипухлинними засобами. Алопуринол та його активний метаболіт оксипуринол (алоксантин) діють шляхом інгібування ксантиноксидази, ферменту, який утворює сечову кислоту (урати) з ксантину та гіпоксантину [1].

Постановка завдання. На даний час при розробці генеричних препаратів у твердих лікарських формах загальноприйнятим є визначення терапевтичної еквівалентності на основі фармакокінетичних досліджень (біоеквівалентності). Порівняння профілю розчинення за процедурою біовейвер має вирішальну роль при прийнятті рішення щодо доведення еквівалентності генеричного лікарського засобу до референтного препарату [2].

В роботі проведено оцінку еквівалентності генеричного лікарського засобу на основі алопуринолу у формі таблеток по 100 мг з використанням тесту «Розчинення» за процедурою біовейвер. Підтвердження біоеквівалентності генеричного препарату референтному базувалися на результатах трьох основних визначень: 1) розчинність діючої речовини, 2) ступінь проникності діючої речовини, 3) профілі розчинення готового лікарського засобу.

Результати досліджень. Відповідно до Біофармацевтичної системи класифікації (БСК) алопуринол відноситься до I класу, тобто до речовин з високою біофармацевтичною розчинністю та високим ступенем проникнення [3, 4].

Випробування на розчинення, яке проводили відповідно до вимог ДФУ 2.9.3 «Тест «Розчинення» для твердих дозованих форм» [5], має важливу роль при проведенні фармацевтичної розробки лікарських засобів з біологічної точки зору, а також для оцінки якості лікарських засобів для перорального застосування. З біологічної точки зору, активний фармацевтичний інгредієнт повинен пройти солюбілізацію, розчинення в шлунково-кишкових рідинах, перш ніж він почне всмоктуватися. Таким чином, відповідність розчинення генеричного препарату з референтним продуктом є надзвичайно важливою для підтвердження біоеквівалентності та терапевтичної еквівалентності з референтним препаратом [6].

З точки зору якості, під час розробки продукту розчинення *in vitro* використовується як інструмент для оптимізації рецептури для отримання бажаного вивільнення, під час стабільності для оцінки ефективності продукту, для моніторингу якості лікарського засобу.

Для прийняття рішення стосовно рекомендації до реєстрації генеричного лікарського засобу за процедурою біовейвер необхідно враховувати наступні фактори [7, 8]:

1) розчинність та ступінь проникнення діючої речовини;

2) профілі розчинення генеричного та референтного препаратів у середовищах розчинення при pH 1,2, 4,5 та 6,8;

3) властивості допоміжних речовин, що входять до складу лікарського засобу;

4) всі можливі ризики щодо прийняття помилкових рішень на основі результатів процедури біовейвера з урахуванням випадків доведення біоеквівалентності шляхом проведення дослідження *in vivo.*

Визначення кількісного вмісту алопуринолу, який перейшов у розчин, проводили методом адсорбційної спектрофотометрії в ультрафіолетовій області при довжини хвилі 250 нм з використанням кювети товщиною 1 см.

Для побудови калібрувальних графіків готували серію еталонних розчинів фармакопейних стандартних зразків (ФСЗ) алопуринолу з концентраціями 2, 4, 6, 8 і 10 мкг/мл та проводили вимірювання оптичної густини, використовуючи метод адсорбційної спектрофотометрії в ультрафіолетовій області поглинання при 250 нм. Калібрувальні графіки ФСЗ алопуринолу у середовищах розчинення при pH 1,2; 4,5 та 6,8 наведені на рис. 1–3.

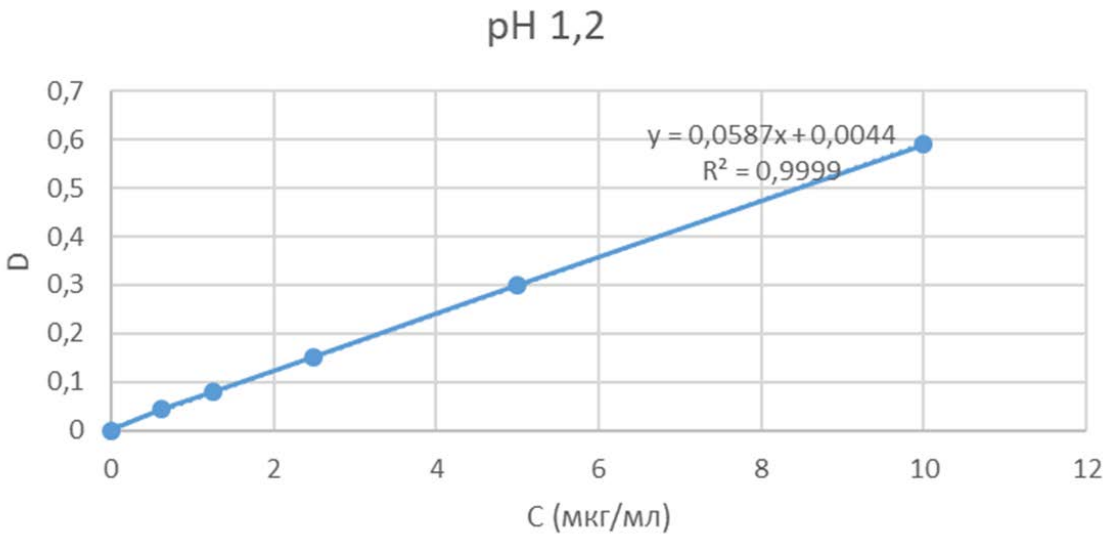


Рис. 1. **Калібрувальний графік алопуринолу при pH 1,2**

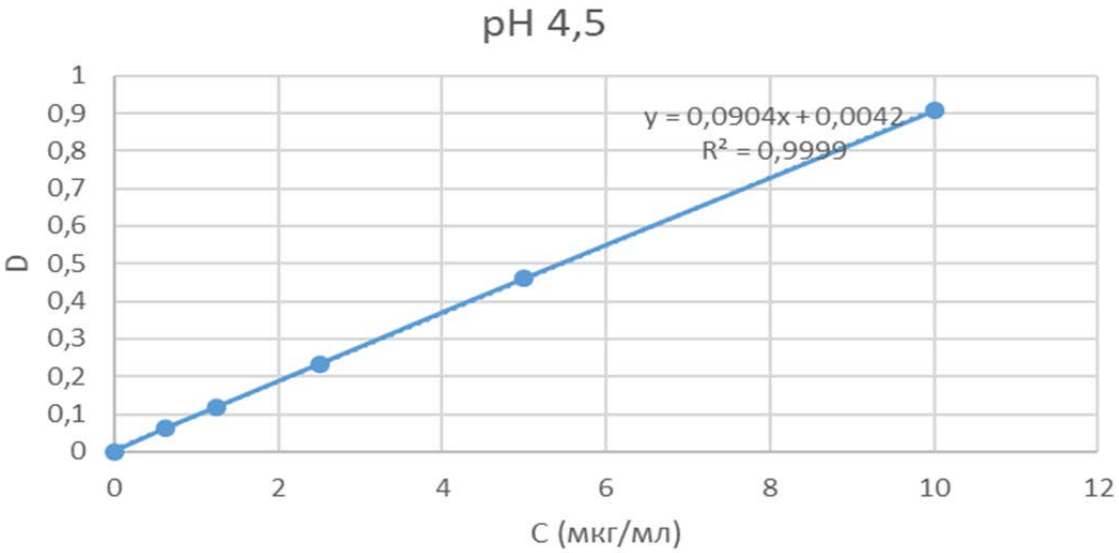


Рис. 2. **Калібрувальний графік алопуринолу при pH 4,5**

Кінетичні криві розчинення алопуринолу для генеричного препарату, таблетки по 100 мг і референтного препарату «Зілорик®», таблетки по 100 мг, в трьох середовищах розчинення наведені на рис. 4–6.

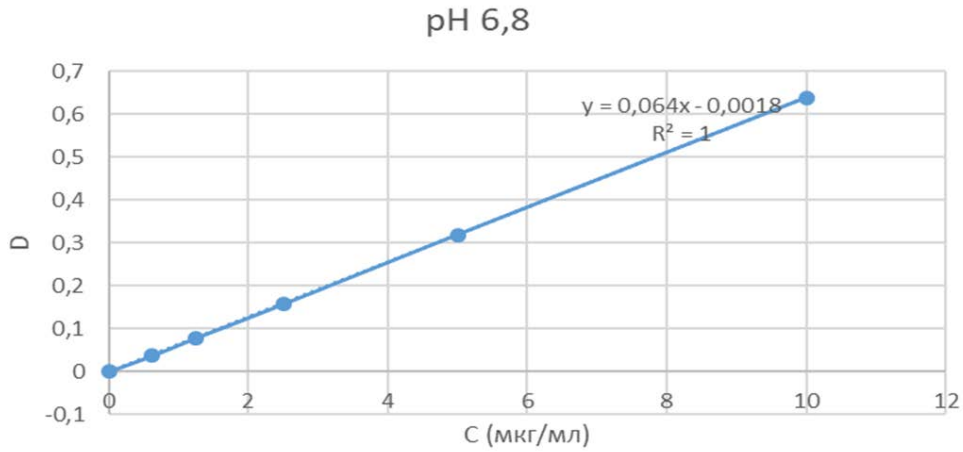


Рис 3. **Калібрувальний графік алопуринолу при pH 6,8**

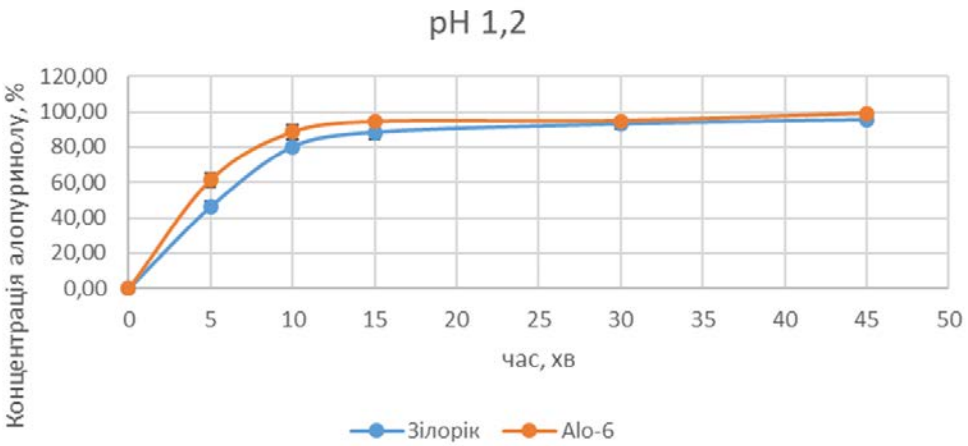


Рис. 4. **Профілі розчинення досліджуваного препарату Алопуринол, таблетки по 100 мг і референтного препарату «Зілорик®», таблетки по 100 мг в середовищі з хлористоводневою кислотою pH 1,2 (n = 12)**

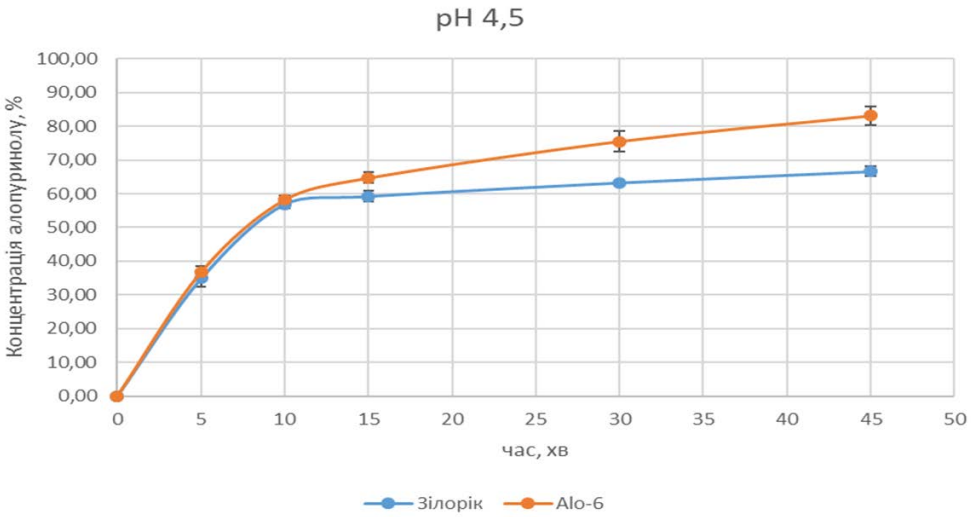


Рис. 5. **Профілі розчинення досліджуваного препарату Алопуринол, таблетки по 100 мг і референтного препарату «Зілорик®», таблетки по 100 мг в середовищі ацетатного буферного розчину pH 4,5 (n = 12)**

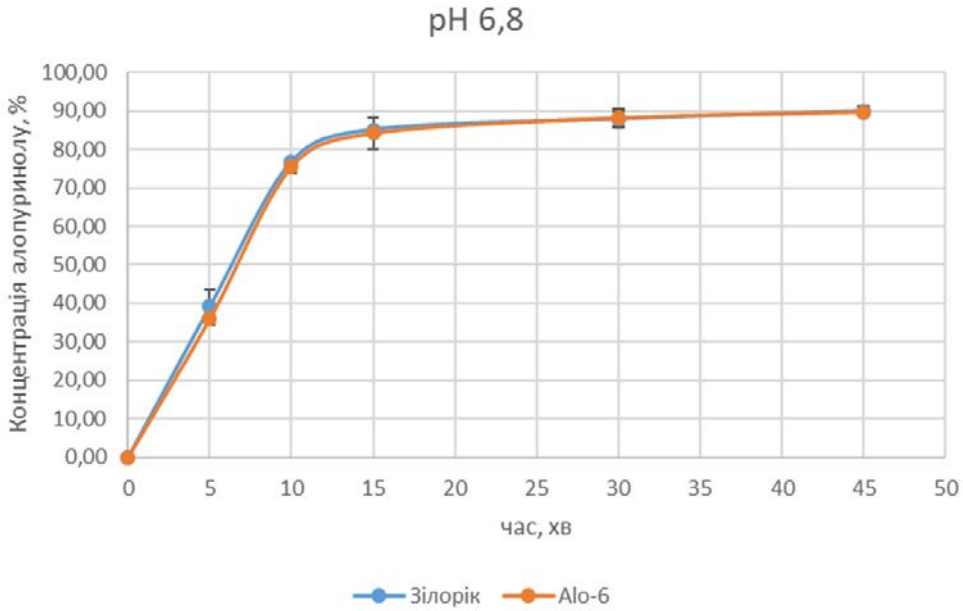


Рис. 6. **Профілі розчинення досліджуваного препарату Алопуринол, таблетки по 100 мг і референтного препарату «Зілорик®», таблетки по 100 мг в середовищі фосфатного буферного розчину pH 6,8 (n = 12).**

На підставі отриманих нами даних було встановлено, що для досліджуваних препаратів у всіх досліджуваних середовищах розчинення (pH 1,2, 4,5 и 6,8) спостерігається подібність профілів розчинення. В середовищі з хлористоводневою кислотою pH 1,2 і в середовищі з фосфатним буферним розчином pH 6,8 за перші 15 хв більше 85% діючої речовини переходить у розчин, отже, кінетичні криві розчинення (профілі розчинення) для даних препаратів в цих середовищах подібні, а препарати за визначенням є «дуже швидкорозчинними» (рис. 4 та рис. 6).

Відповідно до критеріїв, що наведені у Настанові СТ-Н МОЗУ 42-7.4:2022 «Лікарські засоби. Дослідження біоеквівалентності» [6], вважається що ЛЗ дуже швидко вивільняється якщо ≥ 85% препарату розчиняється за ≤ 15 хвилин, що відповідає періоду напіввиведення з шлунка (T50%) у в умовах голодування і вважається швидким вивільненням якщо ≥ 85% препарату розчиняється за 30 хвилин. Аналіз одержаних результатів показує, що при pH 1,2 вивільнення діючої речовини із зразку Alo-6 становило 94,37% за 15 хвилин, при pH 4,5 та 6,8 – відповідно 64,66% і 84,17%. Таким чином було підтверджено, що досліджуваний зразок відповідає встановленим критеріям щодо можливості застосування процедури біовейвер для підтвердження еквівалентності.

Подібність профілів розчинення референтного зразку з профілем розчинення референтного препарату «Зілорик®», таблетки по 100 мг, оцінювали за значенням фактору подібності (f_2), який розраховували за формулою:

$$f2 = 50 \times log\left[\frac{100}{\sqrt{1 + \frac{\sum_{t=1}^{t=n}[R(t) - T(t)]\,2}{n}}}\right], \quad (1)$$

де f_2 – фактор подібності;

n – кількість точок контролю;

R (t) – середнє значення кількісного вмісту алопуринолу, яке перейшло в розчин в кожній вказаній точці відбору, при дослідженні референтного препарату (у %);

T (t) – середнє значення кількісного вмісту алопуринолу, яке перейшло у розчин в кожній вказаній точці відбору, при дослідженні випробовуваного зразку генеричного ЛЗ (у %).

Профілі розчинення можна вважати подібними у випадку, якщо значення фактору подібності знаходиться в межах $50 \leq f_2 \leq 100$.

За результатами проведених розрахунків було встановлено, що фактори подібності профілів розчинення (f_2) становили для досліджуваних препаратів при pH 1,2 $f_2 = 61,12$; при pH 4,5 $f_2 = 58,25$; при pH 6,8 $f_2 = 91,07$. Як видно з одержаних результатів, всі досліджувані зразки мали значення фактору подібності вище 50, що дозволяє підтвердити подібність профілів розчинення до референтного препарату.

Суттєвий вплив на вивільнення алопуринолу з досліджуваного препарату мають якісний і кількісний склад та характеристики допоміжних речовин, а також параметри проведення технологічного процесу одержання таблеток. Можна припустити, що застосування в якості дезінтегранта та розпушувача у складі досліджуваного препарату кросповідону призвело до покращення показників вивільнення алопурінолу при pH 1,2 та pH 4,5 при порівнянні з референтним препаратом. Введення до складу твердих лікарських форм кросповідону призводить до поліпшення та збільшення швидкості розчинення за рахунок адсорбції діючих речовин на частках кросповідону.

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлено, що результати вивчення кінетики розчинення в трьох середовищах при pH 1,2; pH 4,5 та pH 6,8 дозволяють підтвердити еквівалентність профілів розчинення *in vitro* за процедурою біовейвер досліджуваного препарату Алопуринол, таблетки по 100 мг, і референтного препарату «Зілорик®», таблетки по 100 мг, фірми «Aspen Pharma GmbH», Німеччина.

References

1. Helmy, S. A., El-Bedaiwy, H. M. (2014). Pharmacokinetics and Comparative Bioavailability of Allopurinol Formulations in Healthy Subjects. *Clinical Pharmacology in Drug Development*, 3(5), 353–357. https://doi.org/10.1002/cpdd.95.

2. ICH: M9 Biopharmaceutics Classification System-Based Biowaivers Guidance for Industry. U.S. Department of Health and Human Services Food and Drug Administration, May 2021. URL: https://www.fda.gov/media/148472/download#:~:text=The%20BCS%2Dbased%20biowaiver%20is,based%20biowaiver%20in%20this%20guidance.

3. Therapeutic System Research Laboratories. Biopharmaceutics Classification System (BCS) Results. URL: http://166.78.14.201/tsrlinc.com/services/bcs/results.cfm.

4. Holovenko, M. Ya., Baula, O. P., Borysyuk, I. Yu. (2010). Biofarmatsevtychna klasyfikatsiyna systema [Biopharmaceutical classification system]. Kyiv: Avitsena. 2010. 299 p. [in Ukrainian].

5. State enterprise "Ukrainian Scientific Pharmacopoeia Center for the Quality of Medicinal Products" (2015). Derzhavna Farmakopeya Ukrayiny: v 3 t. [State Pharmacopoeia of Ukraine: in 3 vols]. 2nd ed. Kharkiv: Derzhavne pidpryyemstvo "Ukrayinskyy naukovyy

Література

1. Helmy S. A., El-Bedaiwy H. M. Pharmacokinetics and Comparative Bioavailability of Allopurinol Formulations in Healthy Subjects. *Clinical Pharmacology in Drug Development*. 2014. No. 3(5). P. 353–357. https://doi.org/10.1002/cpdd.95.

2. ICH: M9 Biopharmaceutics Classification System-Based Biowaivers Guidance for Industry. U.S. Department of Health and Human Services Food and Drug Administration, May 2021. URL: https://www.fda.gov/media/148472/download#:~:text=The%20BCS%2Dbased%20biowaiver%20is,based%20biowaiver%20in%20this%20guidance.

3. Therapeutic System Research Laboratories. Biopharmaceutics Classification System (BCS) Results. URL: http://166.78.14.201/tsrlinc.com/services/bcs/results.cfm.

4. Головенко М. Я., Баула О. П., Борисюк І. Ю. Біофармацевтична класифікаційна система. К.: Авіцена. 2010. 299 с.

5. Державна Фармакопея України: в 3 т. 2-е вид. Харків: Державне підприємство "Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів", 2015. Т. 1. 1128 с.

farmakopeynyy tsentr yakosti likarskykh zasobiv". Vol. 1. 1128 p. [in Ukrainian].

6. Sivacharan, K., Rajkumar, B., Tausif, A., Siddharth, C. (2022). Simplified Model-Dependent and Model-Independent Approaches for Dissolution Profile Comparison for Oral Products: Regulatory Perspective for Generic Product Development. *AAPS PharmSciTech*, 23, Article number: 53. URL: https://link.springer.com/article/10.1208/s12249-021-02203-7.

7. ST-N MOZU 42-7.4:2022 Likarski zasoby. Doslidzhennya bioekvivalentnosti [ST-N MOZU 42-7.4:2022 Medicinal products. Bioequivalence studies]. Kyiv: Ministry of Health of Ukraine, 2022. 87 p. URL: https://www.dec.gov.ua/wp-content/uploads/2022/12/nastanova-z-bioekvivalentnosti-st-n-mozu-42-7.42022.pdf [in Ukrainian].

8. Who Expert Committee On Specifications For Pharmaceutical Preparations, Who Technical Report Series 937, Fortieth Report, Geneva. URL: http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_937_eng.pdf.

6. Sivacharan K., Rajkumar B., Tausif A., Siddharth C. Simplified Model-Dependent and Model-Independent Approaches for Dissolution Profile Comparison for Oral Products: Regulatory Perspective for Generic Product Development. *AAPS PharmSciTech*. 2022. 23. Article number: 53. URL: https://link.springer.com/article/10.1208/s12249-021-02203-7.

7. СТ-Н МОЗУ 42-7.4:2022 Лікарські засоби. Дослідження біоеквівалентності. Київ: Міністерство охорони здоров'я України, 2022. 87 с. URL: https://www.dec.gov.ua/wp-content/uploads/2022/12/nastanova-z-bioekvivalentnosti-st-n-mozu-42-7.42022.pdf.

8. Who Expert Committee On Specifications For Pharmaceutical Preparations, Who Technical Report Series 937, Fortieth Report, Geneva. URL: http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_937_eng.pdf.

TARASENKO HANNA
Candidate of Technical Science, Associate Professor,
Department of Industrial Pharmacy,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-0995-7322
Scopus Author ID: 58032095000
ResearcherID: JHT-0528-2023
E-mail: tarasenko.gv@knutd.com.ua

HURKOVSKA OLENA
Master's student,
Department of Industrial Pharmacy,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: 13lena14@ukr.net

BAULA OLGA
Candidate of Chemical Science, Professor,
International Agency of Professional Qualifications, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-4305-6517
Scopus Author ID: 57193357927
E-mail: baulapharma@gmail.com

SALIY OLENA
Candidate of Pharmacy, Associate Professor,
Department of Industrial Pharmacy,
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-7103-2083
Scopus Author ID: 57219560195
ResearchGateID: AAC-5721-2019
E-mail: saliy.oo@knutd.edu.ua

[1]TARASENKO H. V., [1]HURKOVSKA O. V., [2]BAULA O. P., [1]SALIY O. O.
[1]Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
[2]International Agency of Professional Qualifications, Ukraine

ASSESSMENT OF *IN VITRO* EQUIVALENCE OF GENERIC DRUG BASED ON ALLOPURINOL IN TABLET FORM

Purpose. *To study the dissolution kinetics of allopurinol-based solid dosage form and assess its equivalence under in vitro conditions compared to the generics medicinal product; to compare the similarity factor of dissolution profiles and evaluate the equivalence of the generic drug.*

Methodology: *The pharmaceutical equivalence of the generic brand Allopurinol, 100 mg tablets, and the reference product Zyloric®, 100 mg tablets, by "Aspen Pharma GmbH" in Germany, was investigated. Analytical studies were conducted using the adsorption spectrophotometry method on a UV-1700 spectrophotometer "SHIMADZU" (Japan) and VK 7000 dissolution apparatus with a VK750D heater Vankel (USA). Analytical balances VR 221S from "Sartorius" (Switzerland) were utilized, along with a pH meter ADWA AD8000 (Hungary). Dissolution kinetics studies were carried out in accordance with the requirements of the State Pharmacopoeia of Ukraine (SPhU) 2.9.3 "Dissolution Test for Solid Dosage Forms, Guidelines on Bioavailability and Bioequivalence Studies, and WHO Guidelines. The studies were conducted in three buffer solutions at pH values of 1.2 (hydrochloric acid solution), 4.5 (acetate buffer solution), and 6.8 (phosphate buffer solution). Buffer solutions were prepared according to SPhU (2.9.3). The dissolution kinetics were conducted under specific conditions using the Vankel VK 7000 apparatus with a paddle (rotation speed 50 rpm), the dissolution medium volume at 900 ml and the dissolution medium temperature at 37±1°C. Samples was withdrawn manually using a 5 ml pipette from a zone midway between the surface of the dissolution medium and the rotating paddle 1 cm away from the vessel wall, at time intervals of 10, 15, 20, 30, and 45 minutes. Collected samples were subsequently filtered through an "Agilent" syringe filter (0.45 μm). After sample collection, the withdrawn volume was adjusted with the corresponding dissolution medium, and the pH of buffer solutions was monitored. Statistical analysis of the results was performed using Microsoft Office Excel with a confidence level of P=95%. To ensure statistically reliable results, the determination was conducted on 12 samples for each of the investigated objects.*

Findings. *The equivalence assessment of the generic allopurinol-based drug in tablet form 100 mg was conducted by studying the dissolution kinetics through the "Biowaiver" procedure in accordance with the requirements of the ST-N MOZU 42-7.4:2022 "Medicinal Products. Bioequivalence Studies" and WHO recommendations. It was found that in a medium with pH 1.2 (hydrochloric acid), the release fraction of the active substance from the analyzed drug was 94.37% within a 15-minute timeframe. Additionally, in the medium with pH 4.5 (acetate buffer solution) and pH 6.8 (phosphate buffer solution), the release fraction of the active substance was 64.66% and 84.17%, respectively. Thus, the dissolution kinetic curves (dissolution profiles) of the generic and reference drugs in the investigated media were similar, and the medicinal products were considered "rapid". The similarity factors of dissolution profiles for the generic drug at pH 1.2, 4.5, and 6.8 were 61.12, 58.25, and 91.07, respectively, confirming the similarity of dissolution profiles to the reference drug since the similarity factor $f_2 > 50$.*

Originality. *The equivalence assessment of the generic allopurinol-based drug in tablet form was conducted in vitro for the first time, confirming the similarity of dissolution profiles through the "Biowaiver" procedure.*

Practical value. *Equivalence of the generic and reference allopurinol-based drugs has been confirmed through the study of the release kinetics of the active substance and the comparison of dissolution profiles in vitro. The obtained results allow to confirm the equivalence of the investigated drugs without the need for in vivo bioequivalence studies.*

Keywords: *allopurinol; biowaver; dissolution kinetics; in vitro; method of adsorption spectrophotometry; tablets.*

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ЩОДО ПОДАННЯ РУКОПИСУ СТАТЕЙ
наукового фахового видання «Технології та інжиніринг» (Technologies and Engineering)

Редакційна колегія журналу «Технології та інжиніринг» приймає до розгляду наукові статті авторів за матеріалами досліджень і науково-технічних розробок. Подані статті розглядаються редакційною колегією журналу «Технології та інжиніринг», і після отримання позитивної рецензії приймаються до публікації.

ПРАВИЛА ПОДАННЯ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ

Для публікації автори подають в редакцію журналу:

(ЕТАП 1) Подаються 2 електронних файли рукопису на електронну адресу vistnuk@knutd.edu.ua:

– один файл – в текстовому редакторі *Microsoft* ***Word*** *for Windows* (версії 97/2000/XP/2003).

Назва файлів: ***Прізвище_statja_ukr.doxc*** та ***Прізвище_statja_ukr.pdf***

В темі листа обов'язково вказується: Стаття у «Технології та інжиніринг».

- Другий файл – сканована копія заяви на перевірку на ознаки академічного плагіату (Додаток 3).

Після отримання електронного примірника рукопису наукової статті, Редакція направляє підтвердження щодо прийняття матеріалів на анонімне рецензування (у разі результату на ознаки академічного плагіату меньше 9,99% схожості у Системі "Unicheck"). У разі необхідності Редакція направляє автору (-ам) пропозиції врахувати зауваження при підготовці статті та доопрацювати її.

(ЕТАП 2) Остаточно, **після доопрацювання**, до Редакції подаються:

1) 1 узгоджений електронний варіант статті (файл – Word формату). Назва файлу: ***Прізвище_statja_ukr.doxc;***

2) відомості про автора (-ів) (укр. та англ. мовами): ПІБ, вчений ступінь та звання, місце роботи (навчання), посада, місто, телефон, e-mail.

3) Назва файлу: ***Прізвище_vidom.doxc***;

4) угоду про публікацію з автором (-ами) статті про авторські права;

5) оригінал платіжного документа, який засвідчує оплату за публікацію. **ОПЛАТА ЗДІЙСНЮЄТЬСЯ ПІСЛЯ ВНУТРІШНЬОГО РЕЦЕНЗУВАННЯ ТА ПРИЙНЯТТЯ СТАТТІ ДО ДРУКУ**.

Відсутність зазначеного вище, а, також, відсутність підписів авторів або узгоджуючих віз, невідповідність вимогам засобу комунікації, наявність орфографічних, граматичних та стилістичних помилок, нехтування необхідністю дотримання лексичних, граматичних і стилістичних норм мови перекладу – **є підставою для відмови** в опублікуванні статті.

Датою надходження рукопису статті в редакцію вважається дата надсилання її **кінцевого варіанту**. Номер журналу, в якому публікуються подані матеріали, визначається редакцією журналу. До друку приймаються рукописи, які раніше не були опубліковані в друкованих та електронних виданнях. Передрук та інше використання публікацій журналу здійснюється тільки за погодженням з редакцією та обов'язковим посиланням на джерело.

ПОСЛІДОВНІСТЬ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СТАТТІ:

УДК: Times New Roman, кегль – 12 pt, без абзацу, міжрядковий інтервал – 1, вирівнювання по лівому краю, прописними літерами;

ПРІЗВИЩЕ ІМ'Я по-БАТЬКОВІ автора (-ів): Times New Roman, кегль – 12 pt, з абзацним відступом – 0,5 см, міжрядковий інтервал – 1, прописні, вирівнювання по лівому краю;

Назва установи (закладу): Times New Roman, кегль – 11 pt, міжрядковий інтервал – 1, з абзацним відступом – 0,5 см, вирівнювання по лівому краю;

НАЗВА СТАТТІ: Times New Roman, кегль – 12 pt, міжрядковий інтервал – 1, прописні, напівжирні, з абзацним відступом – 0,5 см, вирівнювання по лівому краю.

Порожній рядок.

Анотація до статті **українською** мовою: Times New Roman, кегль – 11 pt, курсив, з абзацним відступом – 1,25 см, міжрядковий інтервал – 1, вирівнювання по ширині, назва рубрик – напівжирним;

Анотація (*UA*) не менше 1800 знаків. Рубрики анотації: Мета. Методика. Результати. Наукова новизна. Практична значимість.

Ключові слова анотації **українською** мовою**:** назва – ***напівжирний курсив***, Times New Roman, кегль – 11 pt, міжрядковий інтервал – 1, з абзацним відступом – 1,25 см.; перелік ключових слів: 5–6 слів чи словосполучень, Times New Roman, кегль – 11 pt, вирівнювання по ширині;

Порожній рядок.

Основний **текст статті**: Times New Roman, кегль – 12 pt, міжрядковий інтервал – 1, з абзацним відступом – 1,25 см, вирівнювання по ширині.

Наукова стаття передбачає таку **послідовність** структурних елементів **текстової частини**:

– **Вступ** – постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями (5–10 рядків); актуальність і доцільність питання (5–10 рядків); останні дослідження та публікації, на які спирається автор, виділення невирішених частин загальної проблеми, котрим присвячується дана стаття (звичайно ця частина статті становить близько 1/3 сторінки).

– **Постановка завдання** – формулювання цілей статті. Вказаний розділ вельми важливий, бо з нього читач визначає корисність для себе пропонованої статті; мета статті випливає з постановки загальної проблеми і огляду раніше виконаних досліджень, тобто дана стаття має на меті ліквідувати "білі плями" у загальній проблемі (обсяг цієї частини статті 5–10 рядків).

– **Результати дослідження** – виклад власне матеріалу дослідження (від 5–6 сторінок тексту). Невеликий обсяг потребує виділення головного у матеріалах дослідження; іноді можна обмежитися тільки формулюванням мети дослідження, короткою згадкою про метод вирішення задачі і викладом отриманих результатів; якщо на обсяг статті не має суворих обмежень, то доцільно описати методику дослідження повніше.

– **Висновки** – у закінченні наводяться висновки з даного дослідження і стисло подаються перспективи подальших розвідок у цьому напрямку.

Список використаної літератури – елемент бібліографічного апарату, котрий містить описи використаних джерел. Список використаної літератури приводиться наприкінці статті. При цитуванні літератури в тексті необхідно вказувати номер у квадратних дужках, наприклад [1]. Нумерація літератури в порядку згадування, арабськими цифрами, дотримуючись наскрізної нумерації: Times New Roman 12 pt, міжрядковий інтервал 1, без абзацного відступу, вирівнювання по ширині.

Список джерел – не менше 10 позицій, мовами оригіналу, оформляється згідно з ДСТУ 3017: 2015. У тексті рукопису посилання на літературу ставляться в квадратні дужки.

References – Times New Roman 11 pt, міжрядковий інтервал 1,0, без абзацного відступу, вирівнювання по ширині. Транслітерований (*транслітерація з укр. мови – http://www.slovnyk.ua/services/ translit.php; з рос. – http://www.fotosav.ru/services/transliteration.aspx*) та перекладений англійською список літератури з дотриманням вимог міжнародних стандартів оформлення бібліографічних посилань.

Порожній рядок.

В кінці надається коротко інформація англійською мовою Times New Roman, кегль – 10 pt, прописні, міжрядковий інтервал – 1, назва рубрик – курсив.

Приклад:

IVANOV YURII

PhD, Professor, Department of Applied Ecology, Technology of Polymers and Chemical Fibers of the Kyiv National University of Technologies and Design

https://orcid.org/0000-0001-8718-1202

Scopus Author ID: 9134000100

Researcher ID: H-6012-2020

e-mail: обо'язково

Анотація (*EN*) не менше 1800 знаків.

ПРІЗВИЩЕ І. Б. автора (-ов): Times New Roman, кегль – 12 pt, прописні, міжрядковий інтервал – 1, без абзацу, вирівнювання по центру.

Назва установи (закладу): Times New Roman, кегль – 11 pt, курсив, міжрядковий інтервал – 1, без абзацу, вирівнювання по центру.

НАЗВА СТАТТІ: Times New Roman, кегль – 12pt, міжрядковий інтервал – 1, прописні, напівжирні, без абзацу, вирівнювання по центру.

Анотація до статті англійською мовою: Times New Roman, кегль – 11 pt, з абзацним відступом – 1,25 см., міжрядковий інтервал – 1, вирівнювання по ширині, назва рубрик – **напівжирним**;

Рубрики анотації: Purpose. Methodology. Findings. Originality. Practical value.

Ключові слова анотації англійською мовою: назва – **напівжирний**, Times New Roman, кегль – 11 pt, міжрядковий інтервал – 1, з абзацним відступом – 1,25 см.; перелік ключових слів: 5 – 6 слів чи словосполучень, Times New Roman, кегль – 11 pt, *курсив,* вирівнювання по ширині.

Застосування автоматичного перекладу наукового тексту (статті, анотації, тощо) НЕ ДОПУСКАЄТЬСЯ. Переклад (статті, анотації, тощо) має бути належної якості.

Остаточний висновок щодо публікації схвалює редакційна колегія журналу та повідомляє автора (-ів) телефонним дзвінком або повідомленням по електронній пошті.

Редакція лишає за собою право на незначне редагування та скорочення, зберігаючи при тому головні висновки та авторську стилістику. **Статті, оформлені без дотримання зазначених вимог, розглядатися не будуть**

Статті приймаються на почтову скриньку: vistnuk@knutd.edu.ua.

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ

Комп’ютерний набір та макетування КРИВОНОС Олена

Технічний редактор ПАНАСЮК Ігор

Відповідальний за поліграфічне виконання ОВЕЧКІНА Лілія

Підп. до друку 22.11.2023. Формат 60×84 1/8.
Ум. друк. арк. 13,94. Облік. вид. арк. 10,9. Наклад 100 пр. Зам. ____.

Видавець і виготовлювач Київський національний університет технологій та дизайну.
вул. Мала Шияновська, 2, м. Київ, 01011, Україна.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
Серія КВ №24822–14762 ПР від 19.04.2021р.

Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 993 від 24.07.2002.

TECHNOLOGIES AND ENGINEERING

Computer Typesetting & Modeling KRYVONOS Olena

Technical Editor PANASIUK Ihor

Responsible for printing OVECHKINA Liliia

Printing proof 22.11.2023. Format 60×84 1/8.
Conditional sheet 13.94. Calculated sheet 10.9. Circulation 100 copies. Order N ____.

KNUTD Instant Printing Department.
Mala Shyianovska Street, 2, Kyiv, 01011, Ukraine.

Certificate КВ №24822–14762 ПР від 19.04.2021 р.

Certificate ДК № 993, 24.07.2002.