International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students

об'єктно-орієнтовані технології

ЕОМ

КОНТРОЛЕР

ВИРОБНИЧІ ПРОЦЕСИ

МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА

ACTUAL PROBLEMS OF AUTOMATION AND CONTROL

conference materials

АСУ

АСУ ТП

ІНФОРМАЦІЙНА БАЗА

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ЕОМ

інформаційні системи

Issue № 13 Lutsk - 2025

ОРГАНІЗАТОРИ

Луцький національний технічний університет, Луцьк (Україна)

Вінницький національний технічний університет, Вінниця (Україна)

Національний університет «Львівська Політехніка» (Україна)

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль (Україна)

Люблінська Політехніка, Люблін (Польща)

Політехнічний інститут Браганса, Браганса (Португалія)

Університет Гліндвор, Рексем (Великобританія)

AGH Університет науки і техніки імені Станіслава Сташица, Краків (Польща)

Каунаський університет технологій (Литва)

ORGANIZERS

Lutsk National Technical University, Lutsk (Ukraine)

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia (Ukraine)

Lviv Polytechnic National University (Ukraine)

Ivan Puluj Ternopil National Technical University, Ternopil (Ukraine)

Lublin University of Technology, Lublin (Poland)

Bragança Polytechnic Institute (Portugal)

Glyndwyr University, Wrexham (United Kingdom)

AGH University of Science and Technology, Krakow (Poland)

Kaunas University of Technology (Lithuania)

ГОЛОВА ПРОГРАМНОГО КОМІТЕТУ

І. ВАХОВИЧ – д.е.н., професор, ректор Луцького національного технічного університету (Україна)

ЗАСТУПНИК ГОЛОВИ

О. ПОВСТЯНОЙ – д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

О. БІСІКАЛО – д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій Вінницького національного технічного університету (Україна)

О. ГОЛОТЕНКО – к.т.н., доцент, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Україна)

Б. ПАЛЬЧЕВСЬКИЙ – д.т.н., професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету (Україна)

Ю. ВАШКУРАК – к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету "Львівська Політехніка" (Україна)

PAWEL KOMADA – доктор інженерії, заступник директора інституту електроніки та інформаційних технологій Люблінської Політехніки (Польща)

LUÍS FRÖLÉN RIBEIRO – координатор професор кафедри механічних технологій Політехнічного інституту Браганса (Португалія)

PAULO LEITAO – координатор професор Політехнічного інституту Браганса; Координатор Центру дослідження цифрових технологій та інтелектуальної робототехніки (CeDRI) Політехнічного інституту Браганса (Португалія)

АЛІСОН МАКМІЛЛАН – професор, стратег і лідер у галузі досліджень і технологій, що спеціалізується на обчислювальних та математичних методах для інженерії (Великобританія)

МІХАЛ БЕМБЕНЕК – професор кафедри виробничих систем факультету машинобудування та робототехніки (Польща)

Joris VĖŽYS – професор кафедри машинобудування, Каунаський університет технологій (Литва)

CHAIRMAN OF THE PROGRAM COMMITTEE

I. VAKHOVYCH – Doctor of Economic Sciences, Professor, Rector of Lutsk National Technical University (Ukraine)

DEPUTY CHAIRMAN

O. POVSTIANOI – D.Sn, Professor, Head of the Department of Automation and Computer - Integrated Technologies of Lutsk National Technical University

PROGRAM COMMITTEE

O. BISIKALO – D.Sn, Professor, Head of the Department of Automation and Intelligent Information Technologies at Vinnytsia National Technical University (Ukraine)

O. HOLOTENKO – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Computer-Integrated Technologies, Ivan Puluj National Technical University of Ternopil (Ukraine)

B. PALCHEVSKYI – D.Sn, Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies of Lutsk National Technical University (Ukraine)

Y. VASHKURAK – PhD, Associate Professor, Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Lviv Polytechnic National University (Ukraine)

PAWEL KOMADA – Doctor of Engineering, Deputy Director of the Institute of Electronics and Information Technology of Lublin University of Technology (Poland)

LUÍS FRÖLÉN RIBEIRO – Coordinator Professor of Mechanical Technology Department of Bragança Polytechnic Institute (Portugal)

PAULO LEITAO – Coordinator Professor at Polytechnic Institute of Bragança; Coordinator of the Research Centre in Digitalization and Intelligent Robotics (CeDRI) of Bragança Polytechnic Institute (Portugal)

ALISON MACMILLAN – Professor, strategist, and leader in research and technology specializing in computational and mathematical methods for engineering (United Kingdom)

MICHAL BEMBENEK – Professor, Department of Production Systems, Faculty of Mechanical Engineering and Robotics (Poland)

JORIS VĖŽYS – Professor, Department of Mechanical Engineering, Kaunas University of Technology (Lithuania)

ГОЛОВА ОРГАНІЗАЦІЙНОГО КОМІТЕТУ

Л. ГУМЕНЮК – к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету

ЗАСТУПНИК ГОЛОВИ

Р. ГРУДЕЦЬКИЙ – проректор з науково-педагогічної роботи та цифрової трансформації Луцького національного технічного університету

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

І. КОНДІУС – к.е.н., доцент, декан факультету комп'ютерних та інформаційних технологій Луцького національного технічного університету

П. ГУМЕНЮК – к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету

О. РЕШЕТИЛО – к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету

Ю. ЛАПЧЕНКО – к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету

Л. МАРКІНА – ст. викладач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету

CHAIRMAN OF THE ORGANIZING COMMITTEE

L. GUMENIUK - Ph.D., Associate Professor of the Department of Automation and Computer - Integrated Technologies of Lutsk National Technical University

DEPUTY CHAIRMAN

R. GRUDETSKYI – Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work and Digital Transformation of Lutsk National Technical University

ORGANIZING COMMITTEE

I. KONDIUS - Ph.D., Associate Professor, Dean of the Faculty of Computer and Information Technology of Lutsk National Technical University

P. HUMENIUK - Ph.D., Associate Professor of the Department of Automation and Computer - Integrated Technologies of Lutsk National Technical University

O. RESHETYLO - Ph.D., Associate Professor of the Department of Automation and Computer - Integrated Technologies of Lutsk National Technical University

Y. LAPCHENKO - Ph.D., Associate Professor of the Department of Automation and Computer - Integrated Technologies of Lutsk National Technical University

L. MARKINA – Senior Lecturer, Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Lutsk National Technical University

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ «АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА»

Алексюк О. М. Моделювання процесів створення пористих порошкових матеріалів на основі відходів промислового виробництва з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій ……... 8

Ваць Д. М. Моделювання ущільнення порошкових фільтруючих елементів при радіально- ізостатичному пресуванні …….. 12

Маркіна Л. М., Вісин А. О. Концепція автоматизованої системи керування роботизованим комплексом гнуття листового металу ……. 17

Прус Д. В. Модельні дослідження формування засипки порошків з урахуванням властивості матеріалу на базі моделей випадкової упаковки …….. 20

Ткачук В. М., Приходько О. С., Фурс Т. В. Компенсація інструментальних спотворень при відборі кварцових резонаторів із використанням методів статистичного та інтелектуального аналізу даних …… 24

Хвищун М.В., Ключук М.С., Хвищун Д.М., Панасюк І.В., Драницький Б.О. Створення мобільного застосунку для віддаленого керування розумним будинком …… 27

Цьома О. В., Федік Л. Ю., Смолянкін О. О. Автоматизація технологічного процесу виробництва сульфоамофосу …….. 32

Шабанов Г. В., Андрєєв Ю. М. Практична реалізація програмного комплексу для розрахунку і моделювання роботехнічного комплексу …… 38

СЕКЦІЯ «АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ У СФЕРІ ОСВІТИ, НАУКИ ТА ВИРОБНИЦТВА»

Голіков Т. Ю. Автоматизована система керування технологічним процесом пошиву сорочок ……. 42

Домашенко А. О. Автоматизована система управління вступною кампанією закладу фахової передвищої освіти …….. 46

Закревський В. Л., Приходько О. С. Розробка адаптивного алгоритму керування БПЛА на основі навчання з підкріпленням …… 50

Нежурін В. І., Куваєв В. Ю., Самойленко Ю. О. Дослідження розподілення енергії в робочому просторі ванни електропечі РПЗ-48(63) при виплавці марганцевих феросплавів шлаковим процесом …… 53

Решетило О. М., Лисенко В. Ю. Аналіз технологічного процесу виробництва гранульованого комбікорму як об'єкта керування …… 57

Решетило О. М., Соботович М. І. Аналіз технологічного процесу виробництва сушених овочів як об'єкта керування ……. 64

Савчук М. В., Сацик В. О. Автоматизована система керування технологічним процесом виготовлення круасанів ……. 69

Стьопкін В. В., Коба В. В., Ваколюк А. О. Розробка мікроконтролерної системи керування асинхронним двигуном з фазним ротором на базі електромеханічної станції з контролером НТ-51 …….. 73

Тимченко С. В. Розробка Web-орієнтованої системи управління розкладом навчальних занять на базі Next.js та Prisma ORM …… 78

СЕКЦІЯ «МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ»

Крупський О. В., Приходько О. С., Вавринюк К. В. Розробка інструменту для генерації анотованих датасетів для навчання AI-агентів ……. 83
Лишук В., Крутій П., Антонюк В. Найпростіша математична модель однофазного випростувача …….. 86
Міщенко Д. О. Оцінка соціально-економічних переваг впровадження систем управління на базі DC-мікромереж у сільських населених пунктах з альтернативними джерелами енергії …….. 89
Нечипорук Р. О. Система інтелектуальної діагностики стану електроенергетичного обладнання на основі багатосенсорних даних та гібридних моделей штучного інтелекту …… 92
Стьопкін В. В., Білий В. В., Морозов М. В. Розробка математичної моделі електропривода постійного струму зі спостерігачем стану та пружними ланками 94
Юрченко Ю. В, Заковоротний О. Ю. Підготовка та аналіз джерел фінансових даних, як початковий етап стохастичного моделювання часових рядів методами машинного навчання …….. 99

СЕКЦІЯ «МЕХАТРОННІКА ТА РОБОТИЗОВАНІ СИСТЕМИ»

Гончар А. В., Охримович М. Б. Вплив технологічних факторів на кінематичну точність циліндричних зубчатих коліс …… 104
Павлович А. О. Удосконалення комбінованих захоплюючих пристроїв та особливості їх проектування …… 108
Слабкий А. В., Котик С. І. Аналіз конструкцій та перспективи модернізації універсальних випробувальних машин …….. 114

СЕКЦІЯ «АВТОМАТИКА В ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ»

Герман Б. А., Бартошик О. В., Цюпящук Я. В. Дистанційне керування сигналізацією за допомогою модуля GSM ……. 117
Євсюк М. М., Ковалюк Н. В. Розроблення мікроконтролерного терміналу для автоматизованого керування системами вуличного освітлення …… 121
Заблоцький В. Ю., Гикавий С. В. Розроблення системи відеоспостереження промислового підприємства …… 124
Лишук В., Денисюк К. Застосування принципів спектрального ущільнення для збільшення пропускної здатності оптоволокна …… 131
Лотоцький В. І., Мельник О. В., Власик О. О. Аналіз методів регулювання температури для паяльного обладнання …… 134
Хвищун М. В., Кречик А. П., Хвищун Д. М., Рубльов В. В. Розроблення бездротового комунікаційного пристрою на основі STM32 та LoRa …… 137
Хвищун М. В., Сидорук В. В., Хвищун Д. М., Бернасюк М. В. Розроблення інтелектуальної системи керування домашнім опаленням з використанням Raspberry Pi 4 …… 142
Шумік А. О., Шибенюк Р. А., Захарчук М.Д., Хвищун М. В. Система розпізнавання голосових команд на базі Raspberry Pi …….. 148
Якимчук Н. М., Карпінський Н. К. Організація UART-комунікації в STM32 для системи комутації кінцевих пристроїв …… 152
Якимчук Н. М., Лишук В. В. Методологія інтегрованого моделювання та спільного проєктування в сучасних електронних системах …… 156

СЕКЦІЯ «МІКРО- ТА НАНОСИСТЕМНА ТЕХНІКА»

Денисюк В. Ю., Кравчук О. О. Розроблення та аналіз багатокоординатних мікроманіпуляційних систем точного позиціонування на основі п'єзоелектричних виконавчих пристроїв …….. 161
Денисюк В. Ю., Остаповець А. О. Удосконалення систем контролю якості виробів, виготовлених методами адитивного виробництва …… 170
Дикса В. В., Лапченко Ю. С. Експериментальна установка для вимірювання часових залежностей характеристик матеріалів та її калібрування …… 177
Коць Б. С., Лапченко Ю. С. Способи спостереження та управління станом магнітного вихору …… 183

СЕКЦІЯ «АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА»

УДК 624.131.67 + 532.546
Алексюк О.М.
Луцький національний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СТВОРЕННЯ ПОРИСТИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВІДХОДІВ ПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У цій роботі представлені результати прогнозування, моделювання закономірностей формування структури та властивостей матеріалів з урахуванням розмірів структурних елементів шихти, встановлення фізичних зв'язків між компонентами, структурою та властивостями готового виробу, їх експлуатаційними властивостями для моделювання процесів створення пористих матеріалів з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій.
Ключові слова: моделювання, структура, пористі порошкові матеріали, комп'ютерні моделі, інтегровані технології.

Aleksyuk O. Modeling of processes of creating porous powder materials based on industrial waste using computer-integrated technologies. This paper presents the results of forecasting, modeling the regularities of the formation of the structure and properties of materials, taking into account the sizes of the structural elements of the charge, establishing physical relationships between the components, the structure and properties of the finished product, their operational properties for modeling the processes of creating porous materials using computer-integrated technologies.
Keywords: modeling, structure, porous powder materials, computer models, integrated technologies.

Постановка проблеми. Стійкими сучасними тенденціями промислового розвитку є зростання вимог до якості усіх видів виробів. Отримати нові пористі проникні матеріали з гарантованими властивостями можливо за допомогою традиційної технології порошкової металургії, при цьому необхідно прогнозувати та контролювати параметри їх структури в процесі виготовлення, до яких відносяться: гранулометричний склад шихти, форма часток, щільність формованої заготовки, якість контактів, схема пресування, пористість, густина та їх розподіл по об'єму. Однак, методи порошкової металургії не завжди забезпечують однорідність властивостей всередині матеріалів, і не дають можливість отримувати структурні характеристики матеріалів на якісному рівні. Підвищити ефективність традиційних технологій, а також ввести безвідходне виробництво виробів широкого цільового призначення, зберігати енергію, скорочувати трудові затрати та контролювати параметри структури пористих порошкових матеріалів в процесі їх виготовлення можливо за допомогою моделювання з використанням комп'ютерно-інформаційних технологій [1-3].

Аналіз сучасних технологічних процесів створення пористих проникних матеріалів (ППМ) у порошкової металургії показує, що наявність кореляційних зв'язків між складовими, будовою та властивостями забезпечується всіма операціями технологічного процесу, де початковим етапом є заповнення прес-форм порошком, який визначає не тільки розміри, форму, густину, продуктивність, безпеку і культуру праці, але й впливає на ряд найважливіших властивостей готового продукту. Тому, важливе місце тут займають модельні експерименти прогнозування залежності властивостей матеріалів від технологічних параметрів отримання виробів з використанням аналітичних, числових та числово–аналітичних методів за допомогою 3D моделювання з використанням комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Метою дослідження є розв'язання важливої науково-прикладної проблеми оптимізації технології виготовлення пористих проникних матеріалів конструкційного призначення з використанням відходів промислового виробництва на основі комп'ютерно-інтегрованих технологій їх прогнозування та моделювання.

Аналіз досліджень і публікацій. Як свідчить вітчизняний та світовий досвід останніх десятиріч, успіх розв'язання проблеми створення нових та вдосконалення існуючих методів

отримання пористих порошкових матеріалів вимірюється якістю та ступенем моделювання процесів та явищ, які супроводжують технології їх отримання [4, 5]. Втім, прогнозування, оптимізація та моделювання в порошковій металургії потребують подальшого вдосконалення теоретичних уявлень та їх втілення у вигляді якісних методів та алгоритмів, які реалізуються за допомогою сучасних комп'ютерно-інформаційних технологій.

Сьогоденні проблеми створення пористих середовищ вирішуються на основі застосування комп'ютерного моделювання, яке дозволяє оптимізувати технологію отримання пористих проникних матеріалів. Дане впровадження стало можливим завдяки істотному прогресу в розумінні основних особливостей поведінки порошкових матеріалів у процесі їх деформаційної обробки, досягнутого в останні десятиліття.

Значний внесок у розвиток цих уявлень внесли вітчизняні й закордонні вчені: Г.А. Баглюк, Я.Е. Бейгельзимер, Л.С. Богінский, В.М. Горохов, Ю.Г. Дорофеев, Б.А. Друянов, Г.М. Жданович, Р.М. Кадушніков, В.М. Капцевич, М.С. Ковальченко, А.Г. Косторнов, І.Ф. Мартинова, В.З. Мідуков, О.В. Михайлов, А.М. Лаптєв, В.Е. Перельман, Г.Л. Петросян, І.Д. Радомисельский, О.А. Розенберг, О.В. Роман, В.Д. Рудь, Г.Г.Сердюк, В.В. Скороход, М.Б. Штерн, Shima S., Oyane M., Green A., Kuhn H., Gurson A., Doremus P., Bouvard D., Cocks A., McMeeking R. McMillan A. та ін.

Моделювання закономірностей формування структури та властивостей матеріалів залежать, насамперед, від геометричних факторів часток порошку [6-8].

Розробка методології моделювання розрахунку реальної засипки у форму ППМ, яка представляє більш реалістичний рівень гетерогенності, і є відправною точкою для виявлення фізичної основи поведінки порошку на стадії засипки для більшості випадків, які в даний час визначаються як емпірично, так і характеризується реальними експериментами. В ідеалі, отримані таким чином теоретичні результати, може змінити інженерний погляд на властивості майбутніх ППМ.

Викладення основного матеріалу. Для отримання фільтруючих ППМ з високою проникливістю необхідно використовувати порошки з великим розміром частинок, в той же час як для отримання високої тонкості очистки необхідно використовувати порошки з малим розміром частинок. Ці протиріччя зумовлюють необхідність пошуку нових технологічних прийомів і методів, які б дозволили створювати такі структури ППМ, що забезпечать найбільш оптимальне поєднання експлуатаційних характеристик [9].

Крім того, слід відзначити, що практика застосування нових матеріалів на основі металевих порошків показує, що реалізація у повному об'ємі їх міцнісних і експлуатаційних характеристик потребує суттєвого збільшення рівня прогнозування фізико-механічних властивостей матеріалів та розробки нових методів моделювання, який включає комплексний аналіз процесів формування матеріалів.

Моделювання пористої структури конкретного багатошарового ППМ зі порошку сталі ШХ15 (відходи промислового виробництва) здійснювалося у пакеті прикладних програм MATLAB. За описаною вище методикою автором статті було розроблено програмне забезпечення на мові програмування С++ (програма «FiltrN»), що і дало змогу змоделювати процес радіально-ізостатичного пресування зі заданою пористістю ППМ [10, 11]. Оскільки фільтр має форму витягнутого кругового циліндру (рисунок 1), то моделювання проводилось для наступних параметрів технологічного процесу: діаметр оправки — 40 мм, діаметр армованої еластичної оболонки — 80 мм.

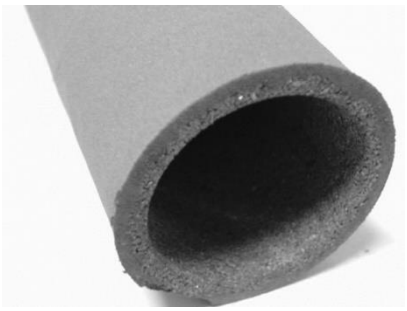
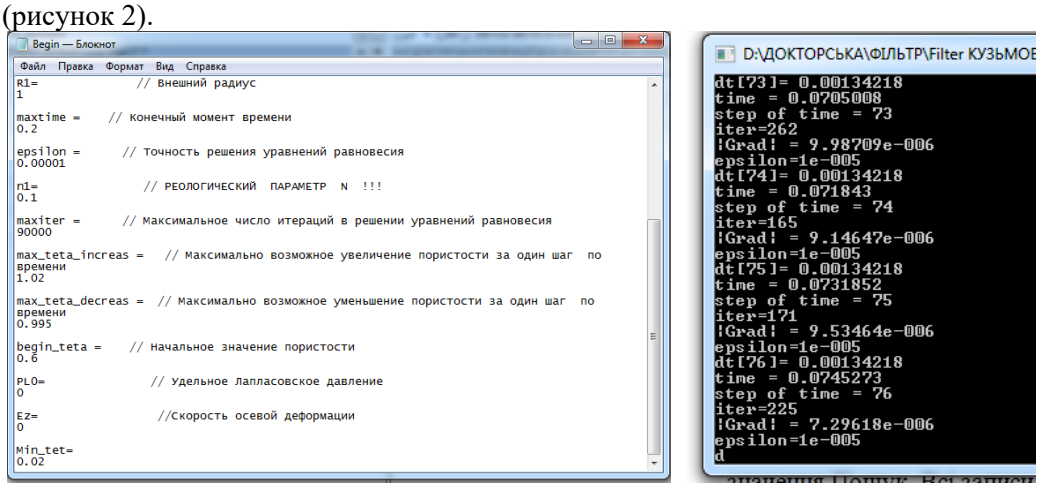


Рисунок 1 – Багатошаровий ППМ з порошку сталі ШХ15 Ø40×220 мм виготовлений методом радіально-ізостатичного пресування

Порошок засипається в простір між оправкою та еластичною оболонкою. Відносна насипна густина порошку ШХ15 становила 20%, тобто початкова пористість становить 0,8.

Для початку роботи з програмою необхідно ввести початкові дані для моделювання. Для цього редагуємо файл Begin.txt, вводячи необхідні параметри для моделювання багатошарового фільтру (рисунок 2).



а) б)

Рисунок 2 – Ввід початкових даних (а) та процес обчислення (б) структурних характеристик багатошарового ППМ

Визначений за результатами наших розрахунків розподіл пористості та радіальної швидкості при моделюванні радіально-ізостатичного пресування багатошарового ППМ показаний на рисунку 3.

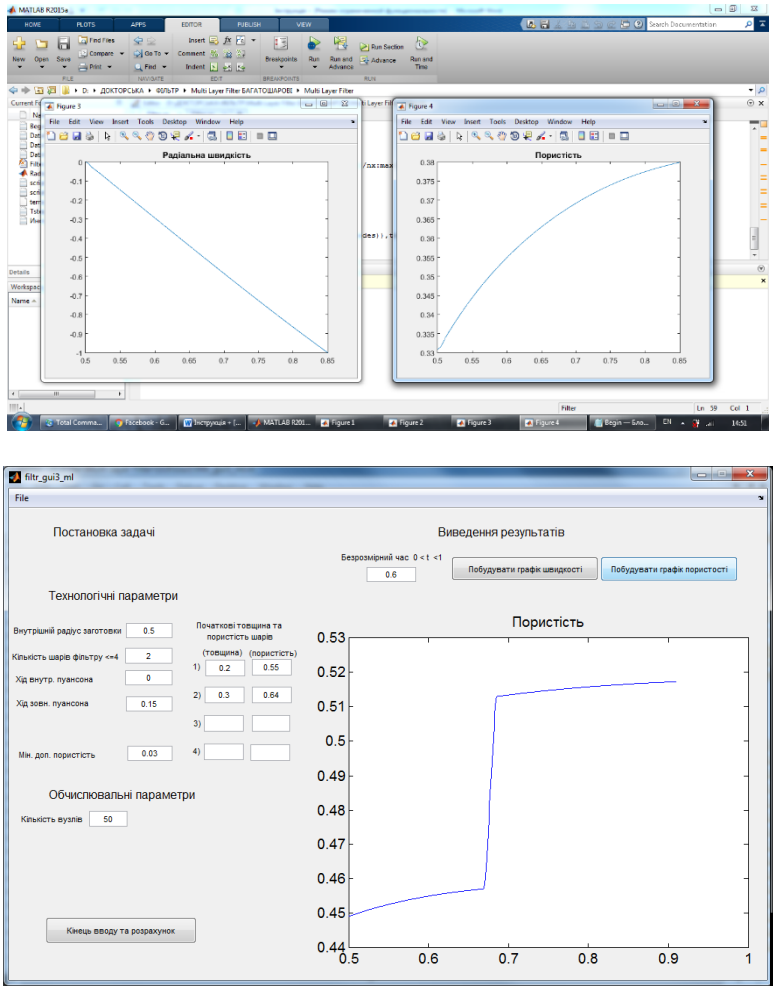


Рисунок 3 – Виведення графічних залежностей впливу радіальної швидкості та розподілу пористості при моделюванні радіально-ізостатичного пресування багатошарового ППМ

Розроблений метод комп'ютерного моделювання дозволив не тільки визначити розподіл пористості та інших характеристик порошкового проникного матеріалу, але й встановити взаємозв'язок між технологічним режимами їх отримання і експлуатаційними характеристиками.

Радіальна швидкість дає можливість керувати розподілом пористості у багатошаровому ППМ та дозволяє аналізувати фактори, які сприяють неоднорідності розподілу густини.

За результатами комп'ютерного моделювання встановлено, що за умов рівномірного розподілу початкової густини, радіально-ізостатичне пресування має наслідком більшу густину, що має місце на внутрішньому циліндрі.

Результатом є той факт, що дрібна пористість, також досягає мінімального значення на внутрішньому циліндрі, в той час як вміст великих пор є максимальним в просторі зовнішнього циліндру (рисунок 4).

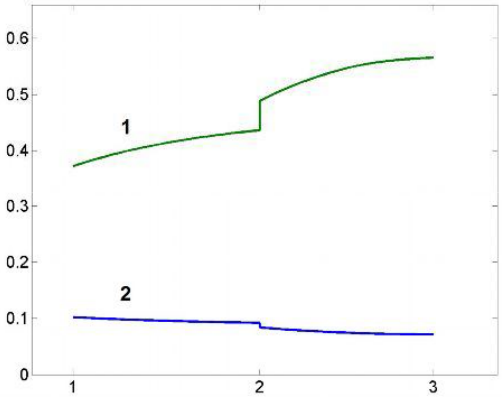


Рисунок 4 – Вміст дрібних (1) та великих (2) пор по перерізу ППМ

Вивчення можливостей та оцінки сучасного програмного забезпечення для комп'ютерних засобів дослідження металографічних зображень з метою визначення якісних та кількісних характеристик різноманітних матеріалів продиктовано науковими та виробничими задачами, які виникли в сучасному матеріалознавстві сьогодення.

Оцінка властивостей структури ППМ має подвійну мету – з одного боку, це оцінка адекватності процесу управління структурою, з іншого боку, це забезпечення оптимальної продуктивності готового виробу.

Висновки. Розроблений новий метод комп'ютерного моделювання пористих порошкових матеріалів. На відміну від існуючих, запропонований метод дозволяє враховувати особливості розподілу пористості та радіальної швидкості при радіально-ізостатичному пресуванні. Новий метод комп'ютерного моделювання дозволив не тільки визначити розподіл пористості й інших характеристик порошкового пористого тіла, але й спрогнозувати вплив їх на експлуатаційні властивості ППМ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kristin Lochmann, Luc Oger, Dietrich Stoyan Statistical analysis of random sphere packing's with variable radius distribution // Solid State Sciences. - №8. - 2020. - P.1397-1413.

2. Konstantin Sobolev, Adil Amirjanov, The development of a simulation model of the dense packing of large particulate assemblies // Powder Technology. - V.141 (2024). - P.155-160.

3. De-fu Zhang, An-sheng Deng, An effective hybrid algorithm for the problem of packing circles into a lager containing circle // Computers & Operations Research. - V.32 (2021). - P.1941-195.

4. Повстяной О.Ю. Металографічний аналіз та обробка зображень мікроструктури сопел для піскоструменевої обробки, які виготовлені методами порошкової металургії / О.Ю.Повстяной, В.А.Сичук, А.Макмиллан, В.Д.Рудь, О.В.Заболотний // Порошкова металургія. - 2015. - № 3/4. - С.234-240**.**

5. Рудь В.Д. Структурні характеристики заготовок при заповненні прес-форм частками нерегулярної форми / Рудь В.Д., Шиберко В.В., Повстяной О.Ю. // Нові технології матеріали, автоматизація виробництва. - 2019. - С.89-95).

6. Рудь В.Д. Аналіз порошкових матеріалів за допомогою програмного комплексу ABAQUS / Рудь В.Д., Шиберко В.В., Повстяной О.Ю. «Сучасні проблеми інформатики в управлінні,

економіці та освіті» : [матеріали XIII міжнародного наукового семінару] / за наук. ред. д.е.н., проф. М. М. Єрмошенка. - К.: Національна академія управління, 2020. - С.77-81.

7. Shyberko V. Modelling of structural and inhomogeneous materials based on the finite element method / V. Shyberko, V.Rud // Actual problems of economics APE. - 2020. - P. 124-130.

8. Рудь В.Д. Роль комп'ютерного та імітаційного моделювання в технологіях отримання структурно-неоднорідних матеріалів / В.Д. Рудь, В.В. Шиберко // Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості. Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів та студентів. - Івано-Франківськ, 2023. - С. 159-161.

9. Повстяной О.Ю. Моделювання пористої структури в багатошарових фільтруючих порошкових матеріалах / Повстяной О.Ю., Кузьмов А.В. // Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Modern Science and Possible Solutions - №10 (14), Vol.1, October 2019. - С.5-9.

10.Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №68842. Комп'ютерна програма «Моделювання пресування багатошарових фільтрів (Фільтр N)» / О.Ю.Повстяной, Кузьмов А.В. Дата реєстрації 29.11.2016 р.

11.Повстяной О.Ю., Кузьмов А.В. Моделювання пористої структури в багатошарових градієнтних фільтруючих матеріалах отриманих методом сухого радіально–ізостатичного пресування металічного порошку з пороутворювачем. Міжвузівський збірник за напрямком „Інженерна механіка". - Випуск 20. - Луцьк, 2021. - С. 140–145.

УДК 621.762

Ваць Д.М.
Луцький національний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ УЩІЛЬНЕННЯ ПОРОШКОВИХ ФІЛЬТРУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ РАДІАЛЬНО- ІЗОСТАТИЧНОМУ ПРЕСУВАННІ

Методом комп'ютерного моделювання досліджено процес радіально-ізостатичного пресування фільтруючих елементів. Розглянуто закономірності ущільнення виробів двох типів: пустотілих циліндрів, в тому числі багатошарових, і фільтрів складної форми у вигляді колби. Встановлено, що при пресуванні фільтруючих елементів циліндричної форми розподіл величини пористості нерівномірний. Зі збільшенням радіуса величина пористості зростає. При виготовленні фільтрів складної форми у вигляді колби розподіл пористості залежить від схеми ущільнення: при радіальному пресуванні більш інтенсивно ущільнюється матеріал стінки, а при осьовому - матеріал дна фільтра. Застосування схеми формування, при якій порошок спочатку ущільнюють в радіальному, а потім в осьовому напрямку, дозволяє отримати більш рівномірний розподіл пористості.

Ключові слова: моделювання, структура, пористі порошкові матеріали, комп'ютерні моделі, інтегровані технології, пресування.

Vac D. Modelization of compounding powder filter elements during radial-isostatic pressing. The process of radial-isostatic pressing of filter elements was investigated using the method of computer modeling. The regularities of compaction of products of two types were considered: hollow cylinders, including multilayer ones, and filters of complex shape in the form of a flask. It was established that when pressing cylindrical filter elements, the distribution of porosity is uneven. With increasing radius, the porosity value increases. When manufacturing filters of complex shape in the form of a flask, the distribution of porosity depends on the compaction scheme: during radial pressing, the wall material is compacted more intensively, and during axial pressing, the material of the filter bottom. The use of a molding scheme in which the powder is first compacted in the radial and then in the axial direction allows for a more uniform distribution of porosity.

Keywords: modeling, structure, porous powder materials, computer models, integrated technologies, pressing.

Постановка проблеми. Одним із важливих напрямків порошкової металургії є створення пористих проникних матеріалів (ППМ), працездатність та область застосування яких визначається наявністю взаємозв'язаної структури пор.

Вибір оптимальних параметрів технологічного процесу пресування є складним завданням. Тому поряд з традиційними методами досліджень, в даний час все більш широко застосовується метод попереднього комп'ютерного моделювання. Це стало можливим завдяки істотному прогресу в розумінні основних особливостей поведінки порошкових матеріалів в процесі їх ущільнення, створення відповідних математичних моделей.

Розвиток засобів обчислювальної техніки та чисельних методів дозволили проводити комп'ютерне моделювання складних технологічних процесів.

Комп'ютерне моделювання поведінки фільтруючих елементів, що ущільнюються, при ізостатичному пресуванні, встановлення закономірностей зміни форми елемента та розподілу пористості за його об`ємом є актуальною проблемою.

Метою дослідження є процес радіально-ізостатичного пресування фільтруючих елементів. Розглянуто закономірності ущільнення виробів двох типів: пустотілих циліндрів, в тому числі багатошарових, та фільтрів складної форми у вигляді колби методом комп'ютерного моделювання. Матеріал фільтруючих елементів – сталь ШХ15, матеріал еластичного елемента - поліуретан. У зв'язку з симетрією розглядали половину осьового перерізу фільтра, що ущільнюється.

Аналіз досліджень і публікацій. ППМ широко застосовуються в різних галузях сучасної промисловості [1-3]. Зокрема, вони використовуються в якості фільтрів, що забезпечують очищення рідин і газів.

Перспективним методом отримання фільтруючих елементів є радіально-ізостатичне пресування порошків [4-6]. Метод дозволяє виготовляти довгомірні вироби простої та складної форми з рівномірним розподілом пористості. Ущільнення порошку відбувається під впливом еластичного елемента, що дозволяє ефективно механізувати та автоматизувати процес, підвищити культуру виробництва, зменшити енерговитрати тощо. Малі об'єми проміжних середовищ дозволяють зменшити металомісткість, габарити і вартість обладнання порівняно з іншими видами пресування.

Методом радіально-ізостатичного пресування отримують також багатошарові фільтри, пористість шарів яких відрізняється. Завдяки наявності змінної пористості має місце більш рівномірній розподіл забруднювача по об'єму у порівнянні з одношаровими фільтруючими елементами, що дозволяє збільшити ресурс роботи фільтру. При цьому ефективність очищення підвищується [7, 8].

При пресуванні багатошарових фільтрів навантаження знімається після ущільнення кожного шару. У порожнину між отриманим шаром і еластичним елементом, що прийняв первісну форму, засипається новий порошок, далі процес пресування триває. Для розширення асортименту фільтруючих пористих порошкових виробів, економії сировини та витрат на виготовлення суцільний еластичний вкладиш можна виготовляти у вигляді набору вкладишів один в одному. Це дає змогу керувати товщиною шарів і отримувати вироби з більш широким діапазоном розмірів, а також дозволяє покращити технологічність та культуру пресування.

Технологічні параметри процесу пресування визначають розміри, форму і розподіл властивостей за об`ємом виробів, що, в свою чергу, впливає на експлуатаційні властивості фільтрів.

Викладення основного матеріалу.

1. Пресування фільтруючих елементів, що мають циліндричну форму. Схема пресування фільтра, що має форму пустотілого циліндра, наведена на рисунку 1. Переміщення внутрішньої поверхні порошку 1 в напрямку зменшення радіусу обмежено жорсткою оправкою 2. Зовнішня поверхня виробу переміщається в радіальному напрямку під впливом еластичного елемента. При моделюванні вважали, що ця поверхня рухається з постійною швидкістю. На торцях циліндра переміщення в осьовому напрямку вважали рівним нулю. Величина початкової пористості засипаного порошку була 0,8. Діаметр оправки дорівнював 20 мм.

Початковий зовнішній діаметр одношарового фільтруючого елемента (та внутрішній діаметр еластичного елемента) дорівнював 40 мм.

Розглядалося також ущільнення двошарових і тришарових фільтрів. При моделюванні ущільнення двошарових порошкових фільтрів величина внутрішнього діаметра еластичного елемента дорівнювала також 40 мм. Внутрішній діаметр еластичного елемента при пресуванні тришарового фільтра змінювався і підбирався для кожного шару окремо.

Результати моделювання по розподілу пористості по перерізу фільтруючих елементів наведені на рисунку 2.

При ущільненні одношарового фільтра розподіл пористості нерівномірний (рисунок 2,а). Зі збільшенням радіуса пористість зростає. Отриманий результат відповідає даним, наведеним в роботах [9, 10]. По мірі збільшення ступеня деформації різниця між величинами пористості матеріалу у внутрішньої і зовнішньої поверхонь фільтра зменшується.

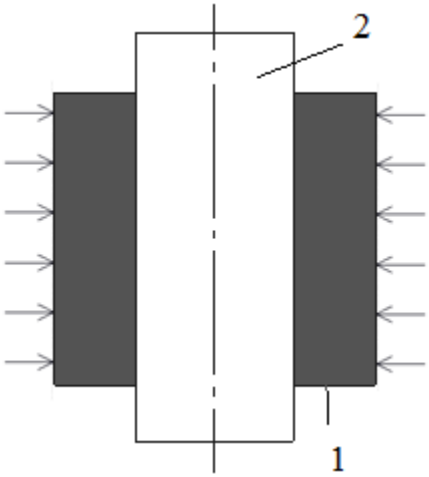
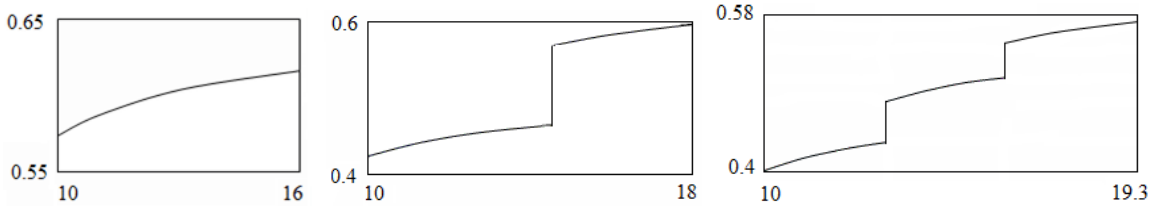


Рисунок 1 – Схема ущільнення фільтруючого елемента циліндричної форми:
1 - порошок, що ущільнюється, 2 - оправка



а) *б*) *в*)

Рисунок 2 – Розподіл пористості по радіусу (мм) в одношаровому (а), двошаровому (б) і тришаровому (в) фільтруючих елементах

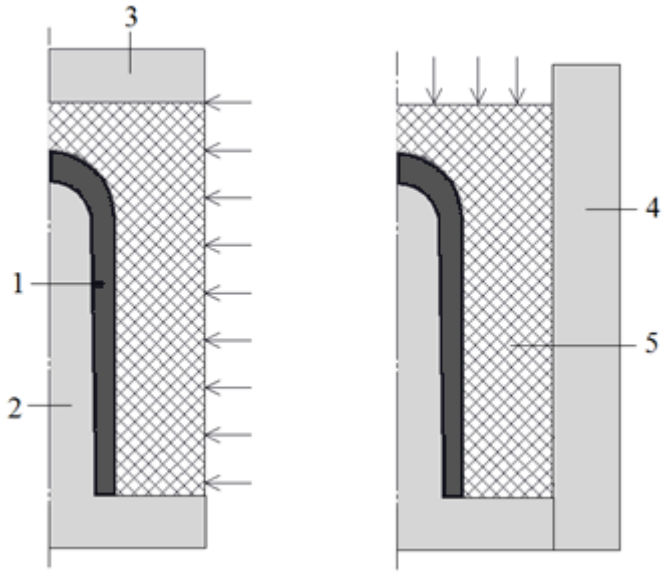
На рисунку 2,б представлено розподіл пористості в двошаровому фільтрі. Ущільнення другого (зовнішнього) шару відбувається так само, як і першого шару. При цьому більш щільний внутрішній шар деформується незначно та виконує роль оправки. Подальше збільшення навантаження призводить до того, що настає момент, коли зовнішній шар ущільнився і обидва шари продовжують деформуватися одночасно.

Ущільнення шарів тришарового фільтра відбувається аналогічно (рисунок 2,в). Товщиною і пористістю шарів можна управляти за рахунок зміни початкової пористості засипаного порошку, внутрішнього діаметра еластичного елемента, а також тиску пресування.

2. Пресування фільтруючих елементів складної форми у вигляді колби. Розглядалися дві схеми ущільнення: радіальне (рисунок 3,а) та осьове (рисунок 3,б). Початкова пористість фільтруючого елемента дорівнювала 0,7. Ущільнення відбувалося на оправку під впливом еластичного середовища.

Вважали, що оправка нерухома. Також вважали, що при радіальному ущільненні нерухома кришка (3 на рисунку 3), а при осьовому ущільненні нерухома стінка (4 на рисунку 3).

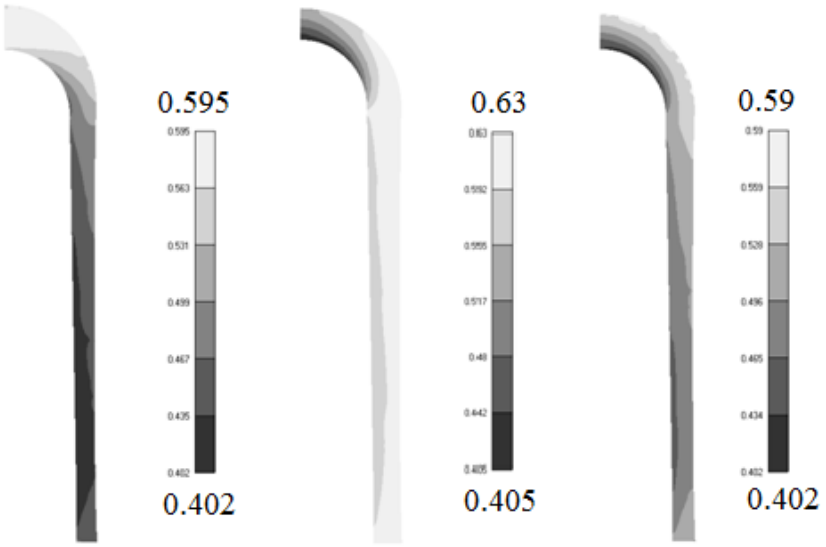
Поверхня поліуретану, на яку здійснювалося силове навантаження, переміщалася з постійною швидкістю в радіальному (радіальне ущільнення), або в осьовому (осьове ущільнення) напрямку.



а) *б*)

Рисунок 3 – Схеми радіального (а) та осьового (б) ущільнення фільтруючого елемента складної форми у вигляді колби: 1 - порошок, що ущільнюється; 2 - оправка; 3 - кришка; 4 - стінка; 5 - еластичний елемент

Результати моделювання по розподілу пористості по перерізу фільтруючих елементів у вигляді колби наведені на рисунку 4.



а) *б*) *в*)

Рисунок 4 – Розподіл пористості при радіальному (а), осьовому (б), радіальному та осьовому (в) ущільненні

У початковий момент при радіальному навантаженні відбувається ущільнення стінки фільтруючого елемента (рисунок 4,а). Розподіл пористості по радіусу стінки фільтра нерівномірний. Зі збільшенням радіуса пористість зростає. При подальшому пресуванні відбувається збільшення відносної щільності стінки і поширення процесу ущільнення на дно фільтруючого елемента. Проте, як видно з рисунку, у кінці процесу пресування величина пористості в області дна фільтра значно вище, ніж в області стінки. Характер зміни пористості по радіусу стінки залишається таким же, як

на початку пресування. Розподіл пористості по висоті стінки нерівномірний: у нижній і верхній частині пористість вище.

На рисунку 4,б представлений розподіл пористості та накопиченої пластичної деформації при осьовому навантаженні. Найбільш інтенсивно порошок ущільнюється в області дна фільтра. Розподіл пористості по радіусу дна нерівномірний. Зі збільшенням радіуса пористість зростає. Ущільнення порошку в області стінки відбувається в меншому ступені. У внутрішній поверхні стінки пористість нижче, а у зовнішній - вище.

Таким чином, як при радіальному, так і при осьовому ущільненні порошку розподіл величин пористості нерівномірний. У першому випадку менш інтенсивно ущільнюється дно, а в другому - стінка фільтра. У зв'язку з цим була розглянута схема ущільнення, при якій порошок спочатку ущільнювали в радіальному, а потім в осьовому напрямку.

Результати моделювання представлені на рисунку 4,в. На першому етапі більш інтенсивно ущільнюється стінка, а на другому етапі - дно фільтруючого елемента. В результаті величина пористості розподілена більш рівномірно.

Висновки. Методом моделювання було визначено, що при радіально-ізостатичному пресуванні порошкового фільтруючого елемента циліндричної форми розподіл величини пористості нерівномірний, а зі збільшенням радіуса величина пористості зростає.

При пресуванні порошкового фільтра у вигляді колби розподіл величин пористості та накопиченої пластичної деформації за об`ємом виробу нерівномірний і залежить від схеми ущільнення.

Застосування схеми, при якій порошок спочатку ущільнюється в радіальному, а потім в осьовому напрямку, дозволяє отримати більш рівномірний розподіл пористості та накопиченої пластичної деформації. Зі збільшенням радіуса величина пористості стінки і дна фільтра зростає, а величина накопиченої пластичної деформації зменшується.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Технології, структура, властивості пористих проникних матеріалів: / Монографія. / Рудь В. Д., Повстяной О. Ю., Заболотний О. В., Богінський Л. С. / Луцьк: РВВ ЛНТУ. – 2016. – 200с.

2. Заболотний О.В. Розвиток процесів ізостатичного пресування ущільнювальних порошкових середовищ / Заболотний О.В., Повстяной О.Ю., Рудь В.Д. // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ, 2021. - Випуск 9. – С. 152-156

3. Повстяной О. Ю. Удосконалення технології виготовлення пористих порошкових матеріалів з використанням відходів промислового виробництва: дис. ... канд. техн. наук. – Луцьк, 2007. – 170 с.

4. Oleksandr Povstyanoy, Oleg Zabolotnyi, Victor Rud, Andriy Kuzmov, Halyna Herasymchuk: Modeling of processes for creation new porous permeable materials with adjustable properties. In: Ivanov V. et al. (eds.) Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 456-465. Springer, Cham (2019), doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_46.

5. Повстяной О. Ю. Визначення розподілу густини пористого проникного циліндра за радіусом при радіально - ізостатичному пресуванні / О. Ю. Повстяной, В. Д. Рудь // Наукові нотатки. - 2016. - Вип. 54. - С. 246 – 252.

6. Оптимізація властивостей багатошарових поруватих проникних матеріалів / Повстяной О. Ю., Рудь В. Д., Імбірович Н. Ю., Гальчук Т. Н., Четвержук Т. І., Смаль М. В., Дзюбинський А. В. *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* 2020. Том 56. №4. С. 88-92

7. Povstyanoy, O., Imbirovich, N., Tkachuk, V., Redko, R., Priadko, O. (2022). Theoretical and Experimental Studies of the Properties of Porous Permeable Materials Obtained from Industrial Waste. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Peraković, D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham.

8. Zaleta O. M., Povstyanoy O. Yu., Ribeiro L. F., Redko R. G., Bozhko T. Ye., Chetverzhuk T. I. (2023). Automation of optimization synthesis for modular technological equipment. Journal of Engineering Sciences, Vol. 10(1), pp. A6-A14, doi: 10.21272/jes.2023.10(1).a2

9. Povstyanoy, O., Imbirovich, N., Redko, R., Redko, O., Savaryn, P. (2024). Numerical Evaluation of the Properties of Highly Efficient Titanium Porous Materials. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham.

10. Моделювання ущільнення порошкового фільтруючого елемента складної форми при радіально-ізостатичному пресуванні / Повстяной О. Ю., Михайлов А. О., Рудь В. Д., Михайлов О. В. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2019. №3. С. 40 – 44.

УДК 681.5:004.896:621.774
Маркіна Л.М., Вісин А.О.
Луцький національний технічний університет
E-mail: l.marckina@lntu.edu.ua, visynandriy@gmail.com

КОНЦЕПЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТИЗОВАНИМ КОМПЛЕКСОМ ГНУТТЯ ЛИСТОВОГО МЕТАЛУ

У даній роботі запропоновано концепцію автоматизованої системи керування роботизованим комплексом гнуття листового металу, що включає визначення функціональних вимог, вибір технічних засобів, структуризацію логіки операцій та формування алгоритмічної моделі роботи обладнання. Подана концепція слугує основою для подальшої розробки програмного забезпечення та впровадження повноцінної системи автоматизації у виробничих умовах. Крім того, сформована архітектура може бути адаптована до різних типів технологічних ліній, масштабів виробництва та рівнів автоматизації, що розширює можливості її практичного застосування. Запропонований підхід створює передумови для підвищення точності, продуктивності та безпеки процесу гнуття, а також відкриває перспективи інтеграції інтелектуальних модулів керування й сучасних засобів сенсорного моніторингу.

Ключові слова: *роботизований комплек, автоматизація гнуття металу, система керування, промислові роботи, сенсори, листозгинний пресб, ModBus, алгоритм керування.*

Постановка проблеми. Автоматизація технологічних процесів гнуття листового металу є актуальним напрямом розвитку сучасного машинобудування. Традиційні листозгинні преси, що керуються оператором, мають низку недоліків: вплив людського фактору, обмежену продуктивність, ризики помилок позиціонування, складність контролю якості та потенційні небезпеки для оператора. За умов масового й серійного виробництва такі обмеження призводять до зниження точності виготовлення деталей, збільшення часу циклу та зростання собівартості продукції.

Огляд актуальних досліджень. У сучасній практиці застосування роботизованих комплексів активно розвивається. Дослідження демонструють, що промислові роботи у поєднанні з інтелектуальними системами керування забезпечують підвищення точності операцій, стабільність позиціонування заготовки та інтеграцію засобів моніторингу.

Зокрема, у роботі Liu & Daley представлено підходи до вдосконаленого PID-керування роботизованими маніпуляторами, що дозволяє зменшити похибку позиціонування та підвищити стійкість руху [1]. Lee & Chen запропонували адаптивний метод керування процесами гнуття, що враховує нелінійні зміни жорсткості матеріалу під час технологічної операції [2]. Ogata та Åström із Murray у своїх фундаментальних працях обґрунтували доцільність використання оптимальних регуляторів, таких як LQR, для систем високої точності та швидкодії [3, 4]. Дослідження Wojtusik містять аналіз методів моделювання й оптимізації виробничих процесів, включно з операціями гнуття металу та інтеграцією роботизованих рішень у виробничі лінії [5].

Серед новітніх досліджень увага приділяється [6-9]:

– синхронізації роботів із CNC-пресами та оптимізації циклу гнуття;

– застосуванню оптичних та індуктивних сенсорів для підвищення точності розпізнавання положення заготовки;

– адаптивному позиціонуванню на основі машинного зору та нейромережевих алгоритмів;

– автоматичному моніторингу стану обладнання у цифрових виробничих середовищах.

Проведений аналіз дозволив зробити висновок, що існуючі сучасні роботизовані комплекси на сьогоднішній день відзначаються високою точністю, швидкодією, адаптивністю та здатністю до інтеграції у складні автоматизовані виробничі системи. Отримані результати свідчать про те, що створення автоматизованої системи керування роботизованим комплексом гнуття металу є технічно обґрунтованим та перспективним напрямом удосконалення виробничих процесів.

Зв’язок теми з науковими і практичними задачами. Розробка автоматизованої роботизованої системи гнуття металу безпосередньо пов’язана із сучасними науковими та інженерними викликами, що постають перед промисловістю у контексті цифрової трансформації виробництва. Накопичені результати досліджень у сфері робототехніки, адаптивного керування, оптимізації технологічних процесів та впровадження інтелектуальних сенсорних систем свідчать про зростаючу потребу у комплексних рішеннях, здатних забезпечити високу точність, повторюваність і стійкість технологічних операцій.

Проблеми, визначені на етапі аналізу – низька продуктивність традиційних листозгинних пресів, залежність від кваліфікації оператора, ризики помилок позиціонування, підвищені вимоги до безпеки із загальними тенденціями розвитку роботизованих технологічних систем. Сучасні роботизовані комплекси, що розглядаються у наукових джерелах [1-9], демонструють значний потенціал у підвищенні точності виконання операцій, адаптації до змінних умов та напряму пов’язані із системами контролю й моніторингу. Це створює передумови для практичного впровадження нових систем керування, здатних оптимізувати процеси гнуття та мінімізувати негативний вплив людського фактору.

Розробка автоматизованої системи в даному напрямі спрямована на вирішення ключових завдань:

– забезпечення стабільності технологічних операцій;
– підвищення якості та точності готової продукції;
– зниження енергетичних витрат;
– підвищення рівня безпеки та зменшення участі людини у небезпечних процесах.

Таким чином, удосконалення роботизованих систем гнуття є важливою складовою переходу до концепції промисловості 4.0. Реалізація таких систем сприяє підвищенню рівня автоматизації, забезпеченню гнучкості та адаптивності виробничих ліній, а також створенню умов для подальших досліджень.

Метою статті є комплексний аналіз та обґрунтування підходів до розробки автоматизованої системи керування роботизованим комплексом гнуття листового металу, що включає вибір технічних засобів, побудову алгоритмів керування та дослідження функціонування системи у віртуальному моделювальному середовищі.

Виклад основного матеріалу. Основним елементом традиційного технологічного процесу є листозгинний прес, у якому оператор вручну подає заготовку, встановлює її на робочу площину, вирівнює по задніх упорах та поетапно виконує кожен згин. Після цього він змінює положення деталі, знову базує її, контролює точність прилягання до упорів і лише тоді запускає наступну операцію. У такій системі виникають чималі ризики: неточне базування; неправильна послідовність згинів; втома чи помилки персоналу; обмежена продуктивність; підвищена небезпека виконання операцій.

Для усунення вище перелічених недоліків пропонується роботизований комплекс, до складу якого входять: два роботи FANUC ARC Mate 120iD/12L, листозгинний прес TRUMPF TrueBend 5085, шість станцій позиціонування, конвеєри відведення продукції, система бар’єрної безпеки та повний комплекс сенсорики і виконавчих пристроїв. Використання такої структури забезпечить повну автоматизацію циклу гнуття й транспортування деталей.

Для повноцінного функціонування роботизованого комплексу , одним із ключових моментів є визначення функціональних вимог і можливостей автоматизованої системи керування для забезпечення узгодженої роботи обладнання та підвищення ефективності технологічного процесу.

До основних функцій автоматизованої системи належать:

– контроль наявності та правильності вкладення заготовок;
– автоматичне обертання станцій для подачі матеріалу;
– безпечне керування рухом роботів і пресу;
– контроль послідовності технологічних операцій;
– моніторинг стану механізмів;
– забезпечення виробничого ритму на рівні однієї деталі кожні 30 секунд.

Крім того, доцільно було б передбачити реалізацію механізмів(сценаріїв) виявлення помилкових ситуацій, своєчасного інформування оператора та автоматичного блокування небезпечних зон, що підвищило б надійність і безпечність роботи комплексу та забезпечить стабільність процесу.

Для підвищення ефективності роботи роботизованого комплексу доцільно розглядати різні рівні автоматизації. Один із найбільш результативних підходів передбачає повну автоматизацію

виявлення помилкових ситуацій, інформування оператора та блокування небезпечних зон. Такий варіант є оптимальним для масового або серійного виробництва, де важливо забезпечити безперервність циклу, стабільність параметрів процесу та мінімізувати простої.

Для підприємств зі звичайними або середніми обсягами продукції можливий інший варіант – часткова автоматизація із залученням оператора до реагування на нестандартні ситуації. Це економічно доцільний підхід, який зберігає гнучкість і дозволяє швидко адаптувати систему до зміни номенклатури виробів.

Обидва рішення можуть бути інтегровані в структуру комплексу залежно від виробничих умов, доступних технічних ресурсів та вимог до продуктивності.

З урахуванням розглянутих варіантів автоматизації та вимог до забезпечення надійної й узгодженої роботи всіх складових роботизованого комплексу постає необхідність у формуванні структурно цілісної системи керування. Ефективність подальшої роботи комплексу значною мірою залежить від того, наскільки коректно організовано взаємодію між сенсорами, виконавчими механізмами, роботами та листозгинним пресом. Саме тому доцільним є деталізований розгляд функціональної схеми автоматизації, яка визначає логіку та принципи роботи всіх елементів комплекс

Для забезпечення узгодженої, точної та безпечної роботи роботизованого комплексу гнуття листового металу необхідним є формування цілісної системи автоматизації, що охоплює всі сенсорні, виконавчі та керуючі компоненти. У цьому контексті функціональна схема, технічні засоби, алгоритм керування утворюють єдину інтегровану структуру.

Розробка функціональної схеми включає повний набір обладнання, необхідний для контролю та виконання технологічних операцій: контролер, датчики наявності заготовок, оптичні давачі правильності вкладення, енкодери пресу, індуктивні датчики на роботах, захисні бар’єри, конвеєрні модулі та виконавчі механізми.

Відповідно керування запропонованим роботизованим комплексом пропонується реалізувати за допомогою контролера VIPA CPU 015, який забезпечить збір сигналів від сенсорів, передачу команд роботам і листозгинному пресу через протокол ModBus, а також синхронізацію взаємодії двох роботів у межах спільного технологічного процесу.

Щодо технічних засобів автоматизації для запропонованого комплексу використаємо [10-14]:

– індуктивні давачі XECRO для виявлення металу;

– оптичні давачі PA18CAD10PAMISA для перевірки вкладення;

– електродвигуни PERFECO MS 562-4 для обертання станцій;

– частотний перетворювач NORDAC PRO-SK 500P;

– пневморозподільники FESTO, вакуумний насос PIAB, реле RELPOL та електромагніт YM-180;

– два роботи FANUC ARC Mate 120iD/12L з високою точністю позиціонування (до ±0,08 мм).

Використання зазначених пристроїв дозволяє забезпечити оптимальну точність позиціонування, високу швидкодію та надійність роботи, що напряму впливає на ефективність і продуктивність операцій гнуття металу

Для забезпечення узгодженої роботи всіх елементів роботизованого комплексу недостатньо лише наявності технічних засобів – важливим є чітко структурований алгоритм керування, який визначає послідовність дій роботів, пресу та допоміжних механізмів у межах одного циклу гнуття. Саме він дозволяє синхронізувати операції, зменшити ризики помилок, забезпечити повторюваність результатів і підтримувати стабільний виробничий ритм. Крім того, це дає можливість своєчасно реагувати на зміни стану системи, автоматично коригувати рухи обладнання та забезпечувати безпечне завершення процесу у разі виникнення позаштатних ситуацій. Тому пропонуємо логіку роботи роботизованого комплексу, яка складається з програмних модулів:

1. Перевірка стану системи: наявність заготовок; правильність їх встановлення, готовність обладнання.
2. Забір заготовки: робот виконує пошук, коригує положення, активує вакуум і магніт, перевіряє утримання.
3. Базування у пресі: точне позиціонування в задні упори.
4. Гнуття: робот передає команди пресу, відпускає або утримує деталь залежно від типу згину.
5. Перехоплення: після кожного згину робот забирає деталь та готує її до наступної операції.

6. Скидання деталі: після завершення всіх згинів готова деталь подається на конвеєр.
7. Завершення циклу та підготовка до наступної заготовки.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує актуальність переходу до автоматизованих роботизованих систем гнуття листового металу та демонструє потенційні переваги такого підходу. Запропонована концепція системи керування окреслює основні функції, технічні засоби та логічні принципи організації роботи комплексу, що може слугувати основою для подальшої розробки практичних рішень. Оптимізація алгоритмів, впровадження інтелектуальних методів контролю та експериментальна перевірка роботи комплексу є перспективними напрямами подальших досліджень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Liu T., Daley S. Advanced PID Control and Applications. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001.
2. Lee J., Chen H. Nonlinear Adaptive Control of Sheet Metal Bending Robots. *Journal of Process Control*, 2015.
3. Ogata K. Modern Control Engineering. Prentice Hall, 2010.
4. Åström K. J., Murray R. M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton University Press, 2012.
5. Wojtusik M. Process Modeling and Optimization in Manufacturing. Springer, 2020.
6. Zhang Y., Huang P., Li X. Synchronization of Industrial Robots with CNC Bending Machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018.
7. Martínez L., Lopez P. Optical Sensing for Precision Metal Forming Automation. *Sensors and Actuators A*, 2019.
8. Kim S., Park J. Vision-Based Adaptive Positioning for Robotic Forming Systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2021.
9. Schulz T., Becker R., Müller A. Smart Monitoring of Industrial Forming Equipment within Industry 4.0 Framework. *Procedia Manufacturing*, 2020.
10. Індуктивний датчик URL: https://xecro.com/shop/inductive-3-wire/ips12-s8po30-a2p/ (дата звернення: 19.09.2025).
11. Оптичний датчика URL: https://www.svaltera.ua/catalog/998/6542.php (дата звернення: 15.10.2025).
12. Частотноий перетворювача URL: https://www.nord.com/de/produkte/antriebselektronik/frequenzumrichter-zurschaltschrank-installation/nordac-pro-sk-500p-frequenzumrichter.jsp (дата звернення: 14.10.2025).
13. Контролер URL: https://vipa.com.ua/products/control-systems/slio/cpus/item/015-cefpr00.html (дата звернення: 20.09. 2025).
14. Пневморозподільник URL: https://www.festo.com/us/en/a/575259/?q=vuvs~:sortByFacetValues-asc (дата звернення: 30.08.2025).

УДК 620.18: 621.669.15
Прус Д.В.
Луцький національний технічний університет

МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ЗАСИПКИ ПОРОШКІВ З УРАХУВАННЯМ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛУ НА БАЗІ МОДЕЛЕЙ ВИПАДКОВОЇ УПАКОВКИ

Проведені модельні дослідження формування засипки порошків з урахуванням властивості матеріалу на базі моделей випадкової упаковки. Розглянуто двомірний випадок математичного моделювання засипки металевих порошків у довільний бункер з врахування фізичних характеристик матеріалу.
Ключові слова: пористі проникні матеріали, упаковка, моделювання.

Prus D. Modeling studies of powder block formation taking into account of material properties based on random packing models. Model studies of powders pouring formation taking into account the properties of the material based on random packaging models (two-dimensional case). A two-dimensional

case of mathematical modeling of filling of metal powders in an arbitrary bunker taking into account physical characteristics is considered.

Keywords: porous penetrating materials, packaging, modeling.

Постановка проблеми. Стійкими сучасними тенденціями промислового розвитку є зростання вимог до якості усіх видів виробів. Отримати нові пористі проникні матеріали (ППМ) з гарантованими властивостями можливо за допомогою традиційної технології порошкової металургії, при цьому необхідно прогнозувати та контролювати параметри їх структури в процесі виготовлення, до яких відносяться: гранулометричний склад шихти, форма часток, щільність формованої заготовки, якість контактів, схема пресування, пористість, густина та їх розподіл по об'єму. Однак, методи порошкової металургії не завжди забезпечують однорідність властивостей всередині матеріалів, і не дають можливість отримувати структурні характеристики матеріалів на якісному рівні. Підвищити ефективність традиційних технологій, а також ввести безвідходне виробництво виробів широкого цільового призначення, зберігати енергію, скорочувати трудові затрати та контролювати параметри структури порошкових матеріалів в процесі їх виготовлення можливо за допомогою прогнозування з використанням сучасних засобів моделювання [1-3].

Прогнозування закономірностей формування структури та властивостей матеріалів залежать, насамперед, від геометричних факторів часток порошку. Крім того, аналіз сучасних технологічних процесів порошкової металургії показує, що наявність кореляційних зв'язків між складовими, будовою та властивостями забезпечується всіма операціями технологічного процесу, де початковим етапом є заповнення прес-форм порошком, який визначає не тільки розміри, форму, густину, продуктивність, безпеку і культуру праці, але й впливає на ряд найважливіших властивостей готового продукту. Тому, важливе місце тут займають модельні експерименти прогнозування залежності властивостей матеріалів від технологічних параметрів отримання виробів з використанням аналітичних, числових та числово–аналітичних методів за допомогою 3D моделювання.

Розробка методології моделювання розрахунку реальної засипки у форму ППМ, яка представляє більш реалістичний рівень гетерогенності, і є відправною точкою для виявлення фізичної основи поведінки порошку на стадії засипки для більшості випадків, які в даний час визначаються як емпірично, так і характеризується реальними експериментами. В ідеалі, отримані таким чином теоретичні результати, може змінити інженерний погляд на властивості майбутніх ППМ.

Тому **метою даного дослідження** є розробка методології розрахунку моделі випадкових пор у ППМ на стадії засипки матеріалу у бункер з урахуванням фізичної основи складових компонентів для двомірного випадку.

Аналіз досліджень і публікацій. Аналіз структурно-неоднорідних матеріалів проводили наукові колективи під керівництвом Ю.Н. Крючкова, В.Д. Рудя, М.Б. Штерна. Особливість цих робіт полягає в тому, що моделюються структурні характеристики матеріалів, які виготовлені із часток регулярної та нерегулярної форм. Результати моделювання перевірялися на натурних експериментах при виготовлені карбідосталей, які довели високу ефективність моделювання. Отримані результати якісно відтворюють процес заповнення прес-форми [4, 5].

У роботах [6, 7] розглядаються інформаційні методи розрахунків фізико-хімічних характеристик порошкових матеріалів. Особливість цих робіт полягає в тому, що проводиться аналіз лише хімічного складу або агрегатного стану початкового матеріалу, а також спостерігається відновлення оксидів, електроліз матеріалів, термічна дисоціація з'єднань.

У закордонній літературних джерелах велика частина роботи по створенню геометрії в значній мірі зосереджена на моделюванні волокна та самої границі геометрії в композиційних матеріалах [8, 9].

Викладення основного матеріалу. Для отримання фільтруючих ППМ з високою проникливістю необхідно використовувати порошки з великим розміром частинок, в той же час як для отримання високої тонкості очистки необхідно використовувати порошки з малим розміром частинок. Ці протиріччя зумовлюють необхідність пошуку нових технологічних прийомів і методів, які б дозволили створювати такі структури ППМ, що забезпечать найбільш оптимальне поєднання експлуатаційних характеристик.

Крім того, слід відзначити, що практика застосування нових матеріалів на основі металевих порошків показує, що реалізація у повному об'ємі їх міцнісних і експлуатаційних характеристик потребує суттєвого збільшення рівня прогнозування фізико-механічних властивостей матеріалів та

розробки нових методів моделювання, який включає комплексний аналіз процесів формування матеріалів.

Аналізуючи більшість вітчизняних та зарубіжних моделей консолідації порошків, авторами запропонована нова методика розрахунку фізичних параметрів, які закладаються для дослідження реальних упаковок.

Новий спосіб, який ґрунтується у застосуванні програмного забезпечення, що реалізує відповідні фізичні моделі, і використовує програмне забезпечення для розробки моделі. В Abaqus набір порожніх сфер може бути створений або як у вигляді пружніх тіл, або ще як жорсткі поверхні, з відповідними точками контакту. Вони можуть бути змодельовані при падінні у визначений простір-контейнер. Фізика контакту і маси при гравітаційному навантаженні забезпечується.

Як приклад, упаковка сферичних часток з досить низькою густиною представлена на рисунках 1 та 2.

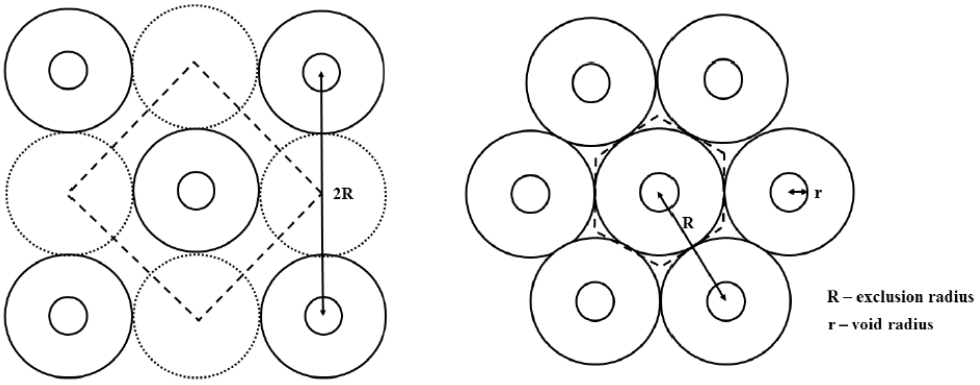


Рисунок 1 – Варіанти конфігурації упаковок створених в Abaqus

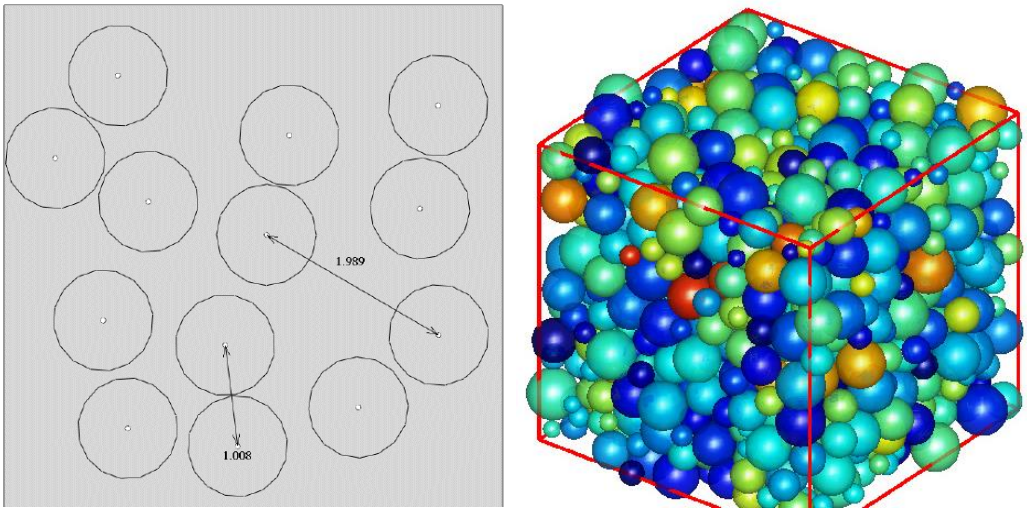


Рисунок 2 – Модель випадкової пористості, яка згенерована в Abaqus з використанням Python

У даному випадку тут прийнятий метод для створення 2D-геометрії з використанням емпіричних законів. При застосуванні генератора випадкових чисел для визначення «частинок» за всією областю контейнера будуються геометричні особливості упаковки. Розподіл точок частинок порошку керується за методом диску Пуассона (рисунок 2). Дані конфігурації визначають мінімальні і максимальні щільності упаковки, за умови дотримання правила, що жодна точка частинки порошку не може бути ближче до іншої, ніж на величину R, і що кожний доступний простір заповнюється.

На підставі результатів, що дає нам можливості Abaqus нескладно розрахувати залежність пористості від радіусу R. Дані наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Залежність пористості від радіусу

R, піксель	Пористість, %
R_1=350	45, 8
R_2=250	41,1
R_3=150	34,2
R_4=50	28,1

У технологіях, що використовуються, такі схеми застосовуються багаторазово, щоб забезпечити високий рівень накопичених деформацій у матеріалі виробів.

Для отримання фільтрувальних ППМ з високою проникністю необхідно використовувати порошки з великим розміром частинок, в той же час як для отримання високої тонкості очистки необхідно використовувати порошки з малим розміром частинок. Ці протиріччя зумовлюють необхідність пошуку нових технологічних прийомів і методів, які б дозволили створювати такі структури ППМ, що забезпечать найбільш оптимальне поєднання експлуатаційних характеристик.

Крім того, слід відзначити, що практика застосування нових матеріалів на основі металевих порошків показує, що реалізація у повному обсязі їх міцнісних і експлуатаційних характеристик потребує суттєвого збільшення рівня прогнозування фізико-механічних властивостей матеріалів та розробки нових методів моделювання, який включає комплексний аналіз процесів формування матеріалів

Як свідчить вітчизняний та світовий досвід останніх років, успіх розв‘язання проблем, які виникають при створенні нових матеріалів, вимірюється якістю та ступенем прогнозування процесів та явищ, які супроводжують ці технології. Втім, прогнозування та моделювання в порошковій галузі потребують подальшого вдосконалення теоретичних уявлень та їх втілення у вигляді якісних методів та алгоритмів, які реалізуються за допомогою сучасних обчислювальних середовищ, програм та візуальних пакетів із застосуванням відповідної комп’ютерної техніки.

Аналіз розподілу пористості ППМ здійснювався за допомогою прикладної програми Smart-eye (рисунок 3). Програмне забезпечення дозволяє визначити необхідні характеристики, які потрібні для якісної та кількісної оцінки структури будь-якого матеріалу, в тому числі і пористого.

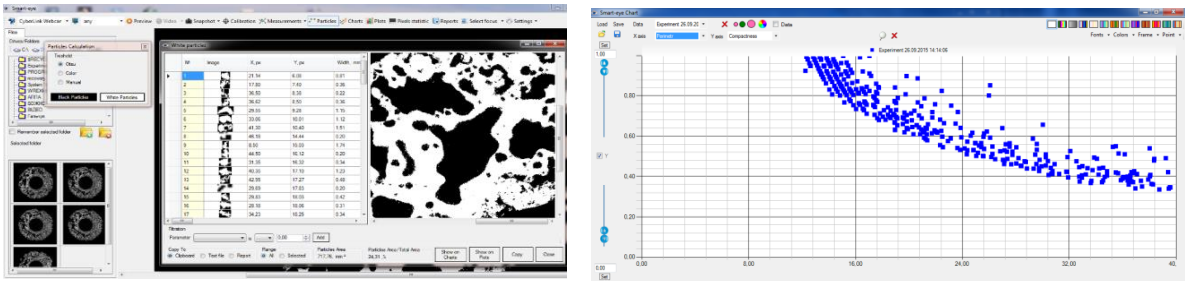


Рисунок 3 – Аналіз розподілу пористості ППМ здійснювався за допомогою прикладної програми Smart-eye

Отриманий розподіл пористості дає наочне уявлення про розподіл частинок за розмірами за умови, що інтервали радіусів у фракціях однакові, та характеризує диференціальний розподіл частинок по площі циліндричного бункера.

Висновки. Практика розрахунку нових пористих матеріалів на основі металевих порошків показує, що реалізація у повному об’ємі їх міцнісних і експлуатаційних характеристик потребує суттєвого збільшення рівня прогнозування фізико-механічних властивостей матеріалів та розробки нових методів моделювання, який включає комплексний аналіз процесів формування матеріалів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Технології, структура, властивості пористих проникних матеріалів: / Монографія. / Рудь В. Д., Повстяной О. Ю., Заболотний О. В., Богінський Л. С. / Луцьк: РВВ ЛНТУ. – 2016. – 200с.

2. Заболотний О.В. Розвиток процесів ізостатичного пресування ущільнювальних порошкових середовищ / Заболотний О.В., Повстяной О.Ю., Рудь В.Д. // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛНТУ, 2021. - Випуск 9. – С. 152-156.

3. Рудь В.Д. Структурні характеристики заготовок при заповненні прес-форм частками нерегулярної форми / Рудь В.Д., Шиберко В.В., Повстяной О.Ю. // Нові технології та матеріали, автоматизація виробництва. – 2014. – С.89-95.

4. Повстяной О.Ю. Металографічний аналіз та обробка зображень мікроструктури сопел для піскоструменевої обробки, які виготовлені методами порошкової металургії / О.Ю.Повстяной, В.А.Сичук, А.Макмиллан, В.Д.Рудь, О.В.Заболотний // Порошкова металургія. – 2015. – № 3/4. – с.234-240.

5. Oleksandr Povstyanoy, Oleg Zabolotnyi, Victor Rud, Andriy Kuzmov, Halyna Herasymchuk: Modeling of processes for creation new porous permeable materials with adjustable properties. In: Ivanov V. et al. (eds.) Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 456-465. Springer, Cham (2019), doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_46.

6. Оптимізація властивостей багатошарових поруватих проникних матеріалів / Повстяной О. Ю., Рудь В. Д., Імбірович Н. Ю., Гальчук Т. Н., Четвержук Т. І., Смаль М. В., Дзюбинський А. В. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2020. Том 56. №4. С. 88-92

7. Young C, McMillan AJ, Ravey E, Verdicchio J, Quinn J, McIlhagger A, Buchanan S “The hybrid approach of a 3D textile composite finite element modelling technique at meso-scale level” 18th ICCM, South Korea, 2021.

8. Potter E, Pinho ST, Robinson P, Iannucci L, McMillan AJ “Mesh generation and geometrical modelling of 3D woven composites with variable tow cross-sections” Computational Materials Science 2022. V.51. P.103–111.

9. Matthies HG, “Stochastic finite elements: Computational approaches to stochastic partical differential equations”, Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 88(11), 849-873, 2018.

УДК 621.372.412:621.372.54:519.23:004.89

Ткачук В.М., Приходько О.С., Фурс Т.В.
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк
email: o.prykhodko@lntu.edu.ua

КОМПЕНСАЦІЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СПОТВОРЕНЬ ПРИ ВІДБОРІ КВАРЦОВИХ РЕЗОНАТОРІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ СТАТИСТИЧНОГО ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ

Розглянуто науково-практичну задачу відбору ідентичних кварцових резонаторів для аматорських смугових фільтрів в умовах обмежень бюджетного вимірювального обладнання. Запропоновано дата-орієнтований підхід, що базується на програмній обробці спектральних даних, отриманих за допомогою бюджетного аналізатора спектру. Розроблено програмний інструмент, який реалізує статистичний метод (обчислення центру мас) та метод апроксимації до фізичної моделі (крива Лоренца) методом найменших квадратів. Елементи інтелектуальної обробки даних застосовано для підвищення точності визначення характеристик резонаторів і компенсації інструментальних спотворень. Експериментально доведено, що запропонований підхід забезпечує точність відбору, співставну з прецизійними приладами, що робить методику ефективною альтернативою прямому частотному вимірюванню.

Ключові слова: кварцовий резонатор, кристалічний фільтр, спектральний аналіз, аналіз даних, апроксимація, метод центру мас, крива Лоренца, інтелектуальні методи, інструментальна похибка.

Tkachuk V.M., Prykhodko O.S., Furs T.V. Compensation of Instrumental Distortions in Quartz Resonator Selection Using Statistical and Intelligent Data Analysis Methods. A scientific and practical problem of selecting identical quartz resonators for amateur bandpass filters under the constraints of low-cost measurement equipment is considered. A data-oriented approach based on software processing of spectral data obtained with a budget spectrum analyzer is proposed. A software tool implementing a statistical method (center of mass calculation) and an approximation to the physical model (Lorentz curve) using the least squares method has been developed. Elements of intelligent data processing are applied to

improve the accuracy of resonator characterization and compensate for instrumental distortions. Experimental results show that the proposed approach provides a selection accuracy comparable to that of precision instruments, making the method a valid alternative to direct frequency measurement.

Keywords: quartz resonator, crystal filter, spectral analysis, data analysis, approximation, center of mass method, Lorentz curve, intelligent methods, instrumental error.

Вступ. Ключовим елементом, що визначає селективність сучасних SSB приймально-передавальних пристроїв, є кристалічний фільтр проміжної частоти. Найбільш поширеною в аматорській практиці є топологія драбинчастого фільтра (crystal ladder filter), теоретичні розрахунки якої вимагають використання групи кварцових резонаторів з ідентичними параметрами [1]. Однак, резонатори навіть з однієї партії мають значний розкид параметрів, що робить неможливим отримання якісного фільтра без попереднього відбору компонентів.

Актуальність та постановка проблеми. Задача точної характеристики та відбору кварцових резонаторів є ключовою при проектуванні високоякісних смугових фільтрів. Класичним підходом до вирішення цієї задачі є пряме вимірювання частоти резонансу за допомогою прецизійного частотоміра, що дозволяє отримати дискретні значення з високою точністю, яка, однак, повністю визначається метрологічними характеристиками самого приладу.

Разом з тим, розвиток цифрової обробки сигналів відкриває можливості для застосування альтернативних, обчислювальних методів. В даній роботі досліджується можливість використання для цієї ж задачі більш універсального приладу – аналізатора спектру. На відміну від частотоміра, аналізатор надає повну спектральну картину сигналу, але його точність у визначенні конкретної частоти може бути обмежена апаратними параметрами (зокрема, смугою роздільної здатності, RBW).

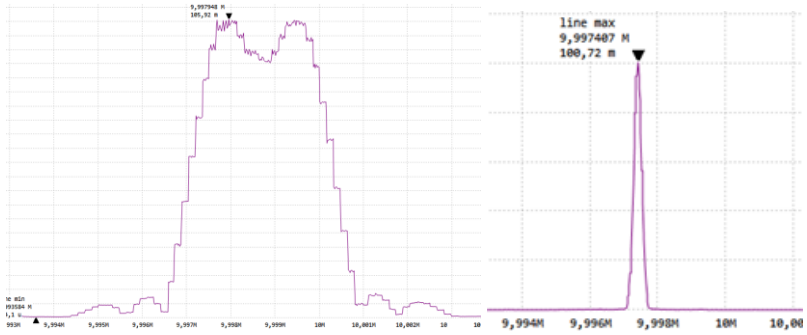
Таким чином, виникає актуальна науково-практична задача: розробити та верифікувати методику, яка дозволяє, шляхом подальшої програмної обробки "сирих" спектральних даних, вилучити (екстрагувати) з них параметри резонатора з точністю, співставною з точністю прямого вимірювання. Це дозволило б розширити арсенал доступних інженерних методик та оцінити переваги та недоліки кожного з підходів.

Огляд існуючих методів. Класичний підхід до вимірювання характеристик кварцових резонаторів базується на визначенні параметрів їх еквівалентної схеми [2,3]. Для цього використовуються або спеціалізовані аналізатори імпедансу, або методи, що вимагають складних вимірювальних стендів. В аматорській практиці, де використання спеціалізованих аналізаторів є ускладненим, широкого розповсюдження набув метод, заснований на побудові простого тестового генератора (напр., за схемою G3UUR [4]), частота якого вимірюється за допомогою високоточного частотоміра. Цей підхід дозволяє з високою точністю визначити частоту серійного резонансу (Fs) і, шляхом додавання в схему калібрувального конденсатора, опосередковано оцінити динамічну ємність резонатора.

Методологія дослідження. В даній роботі досліджується можливість використання для вирішення цієї задачі іншого класу приладів – аналізаторів спектру. Ставиться науково-практичне питання: чи можливо, за відсутності прецизійного частотоміра, провести відбір резонаторів з достатньою точністю, використовуючи бюджетний спектроаналізатор, характеристики якого (зокрема, велика мінімальна смуга роздільної здатності, RBW) не призначені для точних частотних вимірювань. Для вирішення цієї проблеми запропоновано комплексний дата-орієнтований підхід, який переносить основний акцент з апаратної точності вимірювання на подальшу програмну обробку даних. Експеримент проводиться наступним чином. Досліджувані кварцові резонатори по черзі встановлюються у тестовий генератор, зібраний за вищезгаданою схемою [4]. Вихідний сигнал генератора подається на вхід спектроаналізатора. Для кожного резонатора знімається та зберігається у цифровому форматі спектральний відгук у вигляді масиву даних [Частота, Рівень] для двох випадків:

- пряме включення резонатора в схему генератора;
- включення резонатора послідовно з калібрувальним конденсатором 22 пФ.

Таким чином, для кожного з резонаторів отримується два масиви даних. На рис. 1 продемонстровано типову різницю у спектральному відгуку одного й того ж резонатора, отриманому на аналізаторах TinySA (RBW=3000 Гц) та TinySA Ultra (RBW=200 Гц), що наочно ілюструє проблему інструментальних спотворень (масштаб по горизонталі однаковий).



а) б)

Рис. 1. Порівняння спектрального відгуку резонатора: а) TinySA, RBW=3000 Гц; б) TinySA Ultra, RBW=200 Гц

Оскільки через інструментальні обмеження приладу спектральний пік має значну ширину та спотворену форму, то для точного визначення центральної частоти застосовується подальша програмна обробка. Для обробки оцифрованих даних розроблено програмний скрипт (Python з використанням бібліотеки SciPy [5]), який реалізує два методи: статистичний та фізичний.

Статистичний метод. Обчислення центру мас (центроїда) спектрального піку.

Фізичний метод. Апроксимація (підгонка) експериментальних даних до фізично обґрунтованої моделі резонансу – кривої Лоренца. Перед апроксимацією дані переводяться з логарифмічної шкали (дБм) в лінійну (мВт) для забезпечення коректності моделювання.

Функція, що описує криву Лоренца, має вигляд:

$$L(f) = C + \frac{A\gamma^2}{(f-f_0)^2} + \gamma^2 \qquad (1)$$

де f – частота; f_0 – центральна частота резонансу (шуканий параметр); γ – половина ширини піку на половині висоти (half-width at half-maximum, HWHM), параметр, пов'язаний з добротністю резонатора; A – амплітуда піку; C – базовий рівень (зсув по осі Y).

Алгоритм підгонки методом найменших квадратів знаходить оптимальні значення параметрів f_0, γ, A та C, які найкраще описують експериментальні дані.

На основі оброблених даних для кожного резонатора визначаються два ключові параметри, що використовуються для подальшого відбору:

- Частота серійного резонансу (Fs). Визначається як центральна частота f_0, отримана з масиву даних для прямого включення резонатора.
- Параметр "тягучості" (ΔF). Визначається як різниця між центральними частотами, отриманими для випадку включення з конденсатором (Fp') та без нього (ΔF = Fp' - Fs). Цей параметр опосередковано характеризує динамічну ємність резонатора (Cm) і є критично важливим для забезпечення однакової ширини смуги пропускання фільтра.

Фінальний відбір групи резонаторів відбувається шляхом мінімізації комбінованого "штрафного балу", що враховує розкид обох параметрів: Fs та ΔF.

Результати та їх обговорення. Проведено експеримент з відбору 4-х резонаторів з вибірки 10 шт. Показано, що запропонований метод дозволяє отримати точність відбору на рівні 11-18 Гц для базової частоти навіть при використанні обладнання з RBW >3 кГц. Для верифікації стійкості методу, результати, отримані з даних бюджетного аналізатора, були порівняні з даними, отриманими на професійному обладнанні.

Висновки. У ході виконаної роботи було досліджено та експериментально верифіковано методику характеристики кварцових резонаторів, засновану на програмному аналізі спектральних даних, як альтернативу класичному методу прямого частотного вимірювання.

Розроблено програмний інструмент, що реалізує два алгоритми визначення центральної частоти резонансу за "сирими" спектральними даними: статистичний метод обчислення центру мас та метод апроксимації до фізичної моделі Лоренца. Проведене порівняння показало, що апроксимація до фізичної моделі дозволяє отримати більш точні результати, зменшивши розкид частот у відібраній групі резонаторів порівняно зі статистичним методом.

Головним результатом роботи є експериментальне підтвердження того, що запропонований підхід дозволяє компенсувати значні інструментальні спотворення бюджетного вимірювального обладнання. Було доведено, що шляхом програмної обробки можливо ідентифікувати ту саму

оптимальну групу резонаторів, що й при використанні прецизійного обладнання, досягнувши співставної точності відбору (розкид частот у відібраній групі склав ~11-18 Гц на частоті 10 МГц).

Таким чином, доведено, що дата-орієнтований підхід є валідною та ефективною альтернативою прямому вимірюванню, що значно розширює арсенал доступних методик для проектування та налаштування радіоелектронної апаратури в умовах обмежених лабораторних можливостей.

Перспективою подальшої роботи є практична побудова двох варіантів смугових фільтрів (з відібраної та довільної груп резонаторів) та порівняльний аналіз їх АЧХ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Carr J. J. IF amplifiers and filters. RF Components and Circuits. 2002. P. 161–184. URL: https://doi.org/10.1016/b978-075064844-8/50008-6 (date of access: 15.10.2025).

2. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. 1168 p. ISBN 978-0-521-80926-9.

3. Gusberti G. F. Characterization of Crystal Resonators. 2024. URL: https://gusbertianalog.com/characterization-of-crystal-resonators/ (date of access: 10.11.2025).

4. Hayward W., Campbell R., Larkin B. Experimental Methods in RF Design. Newington (CT): ARRL, 2003. 512 p. + CD-ROM. ISBN 0-87259-879-9. URL: https://w7zoi.net/oldtech/abstr.pdf (date of access: 15.10.2025).

5. Virtanen P. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. Nature Methods. 2020. Vol. 17. P. 261–272. URL: https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2 (date of access: 15.10.2025).

УДК 004.415.2:004.738.5:004.77

Хвищун М. В., Ключук М. С., Хвищун Д. М., Панасюк І. В., Драницький Б. О.
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

СТВОРЕННЯ МОБІЛЬНОГО ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ ВІДДАЛЕНОГО КЕРУВАННЯ РОЗУМНИМ БУДИНКОМ

У роботі представлено розроблення мобільного застосунку для віддаленого керування системою «розумний будинок», спрямованого на підвищення комфорту користувачів, енергоефективності та рівня автоматизації житлових приміщень. Проаналізовано недоліки традиційних систем керування, які базуються на локальних панелях, ручних перемикачах або закритих пропрієтарних рішеннях і не забезпечують гнучкої логіки, масштабованості та повноцінного дистанційного доступу. Це ускладнює використання таких систем у сучасних умовах, де ключову роль відіграє інтеграція, мобільність та безпека.

Запропонований підхід базується на застосуванні кросплатформної технології Flutter та архітектури «клієнт–сервер», що дозволяє реалізувати універсальний мобільний застосунок для Android та iOS. Застосунок забезпечує керування освітленням, опаленням, вентиляцією, охоронними датчиками та побутовими приладами через захищені канали зв’язку на основі протоколів MQTT та HTTPS. Особливу увагу приділено структурі програмного забезпечення, організації обміну даними між мобільним клієнтом і локальним шлюзом (Raspberry Pi або STM32), механізмам шифрування, аутентифікації користувача та зберіганню телеметричної інформації у хмарних або локальних базах.

Розглянуто процес розробки інтерфейсу, функції моніторингу параметрів у реальному часі, сценарні режими роботи («Комфорт», «Економ», «Авто»), а також особливості інтеграції з датчиками та виконавчими пристроями технологій «розумного будинку».

Ключові слова: мобільний застосунок; віддалене керування; розумний будинок; MQTT; IoT; Flutter; автоматизація; енергоефективність; сенсорні системи; кібербезпека.

Khvyshchun M., Klyuchuk M., Khvyshchun D., Panasyuk I. V., Dranytskyi B. Development of a mobile application for remote control of a Smart Home. The article presents the development of a mobile application for remotely controlling a smart home system, aimed at enhancing user comfort,

improving energy efficiency, and increasing the level of automation in residential environments. The limitations of traditional control systems, which are based on local panels, manual switches, or closed proprietary solutions, are analyzed. Such systems do not provide flexible logic, scalability, or full remote access. These drawbacks complicate their use under modern conditions, where integration, mobility, and security are key considerations.

The proposed approach is based on the use of the cross-platform Flutter framework and a client–server architecture, enabling the creation of a universal mobile application compatible with both Android and iOS. The application provides control of lighting, heating, ventilation, security sensors, and household appliances through secure communication channels using MQTT and HTTPS protocols. Special attention is paid to the software architecture, data exchange mechanisms between the mobile client and the local gateway (Raspberry Pi or STM32), as well as encryption methods, user authentication, and storage of telemetry data in cloud-based or local databases.

The paper covers the interface development process, real-time monitoring capabilities, scenario-based operation modes ("Comfort", "Economy", "Auto"), as well as features of integration with sensors and actuators used in smart home technologies.

Key words: mobile application; remote control; smart home; MQTT; IoT; Flutter; automation; energy efficiency; sensor systems; cybersecurity.

Постановка проблеми. У сучасному світі однією з ключових вимог під час створення та модернізації систем домашньої автоматизації є забезпечення зручності керування, підвищення енергоефективності та розширення можливостей інтеграції різних побутових пристроїв у єдину інтелектуальну мережу. Системи «розумного будинку» відіграють важливу роль у підвищенні комфорту, безпеки та раціонального використання електричної енергії, оскільки дозволяють автоматизувати освітлення, опалення, вентиляцію, охоронні функції та роботу побутових приладів. Наявність сучасних засобів дистанційного керування, зокрема через мобільні застосунки, є необхідною умовою ефективної експлуатації таких систем.

Традиційні підходи до керування домашніми електротехнічними пристроями ґрунтуються на локальних вимикачах, настінних панелях або елементарних пультах керування, що значно обмежує гнучкість користувача. У багатьох житлових приміщеннях і сьогодні використовуються застарілі системи керування без можливості програмування, моніторингу параметрів або отримання телеметрії у реальному часі. Такі рішення не забезпечують віддаленого доступу, не дозволяють адаптувати режими роботи до потреб користувачів і не відповідають сучасним вимогам мобільності та цифровізації побутових процесів.

Класичні механічні або прості електронні регулятори працюють без інтелектуальних алгоритмів, не підтримують сценарні режими («Комфорт», «Економ», «Авто»), не мають засобів кіберзахисту та не здатні інтегруватися з датчиками руху, температури, вологості, безпеки чи мережевими пристроями. Відсутність єдиної точки керування призводить до фрагментованості системи, низької зручності користування та обмеженої функціональності.

Отже, існує потреба у створенні універсального мобільного застосунку для віддаленого керування розумним будинком, який би забезпечував централізовану роботу всіх підсистем, підтримував сучасні протоколи зв'язку (MQTT, HTTPS), надавав засоби телеметрії та міг працювати у складі гібридної архітектури «локальний шлюз + хмарні сервіси». Такий застосунок має підвищити рівень автоматизації, розширити функціональні можливості та забезпечити повний контроль над системою з будь-якої точки світу [1].

Аналіз останніх досліджень. Сучасні системи «розумного будинку» мають розгалужену структуру, що включає сенсорні мережі, виконавчі модулі, локальні контролери, хмарні сервіси та інтерфейси користувача. У таких системах необхідним є застосування більш інтелектуальних, гнучких та технологічно досконалих засобів керування, у тому числі мобільних застосунків, які забезпечують дистанційну взаємодію з усіма компонентами домашньої інфраструктури.

Сучасні мобільні платформи для автоматизації житла виступають як мультифункціональні інструменти, здатні забезпечувати:– збір інформації про стан приміщень та параметри навколишнього середовища;– моніторинг освітлення, опалення, вентиляції та безпекових систем;
– ручне та автоматизоване керування пристроями;
– створення групових сценаріїв роботи («нічний режим», «відпустка», «комфорт»);
– дистанційне керування через захищені мережеві протоколи;– інтеграцію датчиків руху, температури, вологості, диму та інших сенсорів;
– обмін даними з локальними шлюзами (Raspberry Pi, STM32, ESP32).

Проведені дослідження свідчать, що мобільні додатки стають ключовою складовою систем управління розумним будинком, оскільки саме вони забезпечують доступність, мобільність і можливість роботи у реальному часі. У наукових роботах підкреслюється важливість використання легковагових протоколів MQTT і WebSocket для мінімізації затримок; застосування архітектури «клієнт–сервер»; а також дотримання вимог кібербезпеки – шифрування каналів, автентифікації, контролю доступу.

Таким чином, на основі аналізу існуючих рішень можна зробити висновок про потребу побудови універсальних мобільних застосунків, які не просто дозволяють керувати окремими пристроями, а забезпечують комплексне управління всією екосистемою «розумного будинку», підтримують моніторинг, оптимізацію енергоспоживання, інтеграцію різних типів сенсорів та оперативну передачу інформації користувачу[2-6].

Мета роботи. Розроблення мобільного застосунку для віддаленого керування системою «розумний будинок», що забезпечує моніторинг параметрів у реальному часі, керування освітленням, опаленням, системами безпеки та побутовими приладами через захищені мережеві протоколи, а також підтримку сценарних режимів роботи для підвищення комфорту та енергоефективності.

Викладення основного матеріалу. Одним із ефективних рішень створення сучасної системи віддаленого керування «розумним будинком» є розроблення мобільного застосунку, який взаємодіє з локальним контролером через захищені мережеві протоколи. У рамках даної роботи запропоновано систему, що базується на застосуванні кросплатформної технології Flutter та локального шлюзу на основі Raspberry Pi 4 або STM32 з Wi-Fi/Bluetooth-модулем. Основним завданням такої системи є реалізація дистанційного моніторингу та керування побутовими приладами, освітленням, опаленням, вентиляцією та охоронними датчиками в реальному часі.

Аналіз платформи та вибір апаратного забезпечення. У сучасних системах автоматизації будинку важливу роль відіграє локальний контролер, що забезпечує прийом телеметрії від давачів та реле, а також передає дані до мобільного застосунку.

В рамках проєкту обрано два варіанти апаратної платформи**:** Raspberry Pi 4.

Raspberry Pi 4 – це високопродуктивний одноплатний комп’ютер з процесором ARM Cortex-A72.

Його перевагами є:

- підтримка Wi-Fi 2.4/5 ГГц та Bluetooth 5.0;
- можливість роботи як локальний сервер (MQTT, HTTP, WebSocket);
- підключення цифрових сенсорів через GPIO, I²C, SPI, UART;
- робота з базами даних (InfluxDB, SQLite);
- виконання складних алгоритмів автоматизації.

Архітектура програмного забезпечення. Мобільний застосунок створено у середовищі Flutter**,** що дозволяє компілювати програму під Android та iOS. Обмін даними між клієнтом та локальним контролером виконується за допомогою протоколів:

- MQTT – основний канал для телеметрії та команд;
- HTTPS/REST API – налаштування, оновлення параметрів;
- WebSocket – моментальні оновлення стану.

Структурна схема системи подана на рисунку 1.

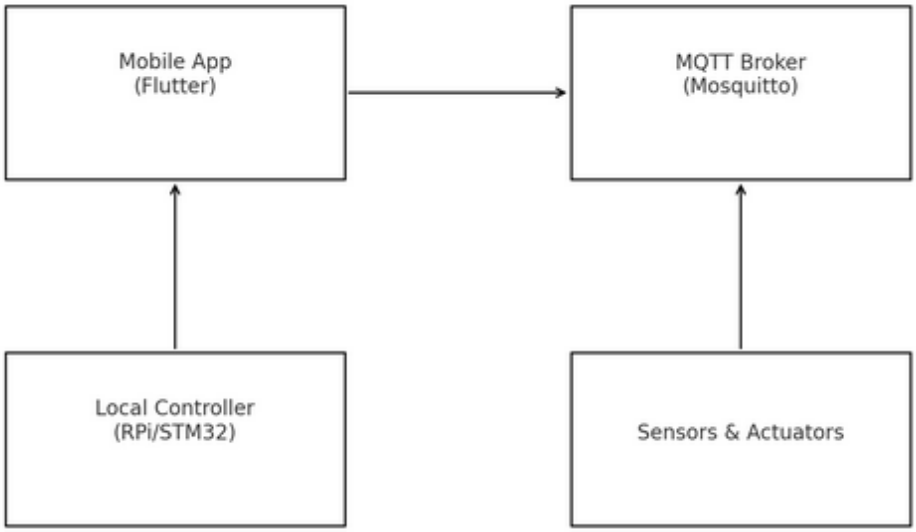


Рисунок 1 – Структура схема системи керування розумним будинком

Вона включає наступні компоненти:

1. Мобільний застосунок (Flutter) – інтерфейс користувача.
2. MQTT-брокер (Mosquitto) – організація топіків.
3. Локальний сервер (Raspberry Pi / STM32+ESP Wi-Fi) – логіка управління.
4. Сенсори (температура, рух, вологість) – вимірювання параметрів.
5. Виконавчі пристрої (реле, димери, серводрайвери) – керування обладнанням.

Дані передаються від сенсорів → до контролера → в застосунок → назад до виконавчих модулів.

Розглянемо програмні компоненти мобільного застосунку. До них входять основні модулі застосунку:

- Dashboard – центральна панель моніторингу;
- Lighting Control – керування освітленням у кімнатах;
- Climate Control – температура, вологість, обігрів;
- Security Module – дверні/віконні датчики, рух, тривоги;
- Automation Scenarios – «Комфорт», «Економ», «Нічний режим»;
- User Authentication – PIN, пароль, біометрія, токени.

Структура мобільного інтерфейсу системи керування розумним будинком, що включає:

- інформаційний блок реального часу;
- панель елементів керування;
- модулі сценаріїв;
- модуль безпеки;
- журнал подій.

Проведемо порівняльний аналіз технологій розробки. Розглянемо таблицю 1, де вибору платформи проведено аналіз трьох популярних технологій.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз технологій розробки

Технологія	Підтримка Android/iOS	Продуктивність	Простота розробки	Оновлення інтерфейсу
Flutter	✓✓	Висока	Висока	Дуже швидке
React Native	✓✓	Середня	Висока	Швидке
Java/Kotlin	✓ Android	Дуже висока	Середня	Середня

Отже, провівши порівняльний аналіз, бачимо що Flutter забезпечує найкращий баланс між швидкістю, кросплатформністю та якістю інтерфейсу.

Результати тестування основних параметрів системи подано у таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати тестування системи

№	Тестовий сценарій	Параметр	Результат	Оцінка
1	Оновлення даних	Затримка MQTT	60–120 мс	Відмінно
2	Відправка команд	Реакція реле	40–70 мс	Відмінно
3	Робота без Інтернету	Локальний режим	Успішно	Норма
4	Продуктивність телефону	CPU навантаження	8–14 %	Низьке
5	Робота 24 год	Стабільність	0 збоїв	Відмінно

У процесі тестування та оцінки основних параметрів бачимо, що дана система відмінно задовольняє всі вимоги.

Розглянемо графічне порівняння продуктивності протоколів, що подано на рисунку 2.

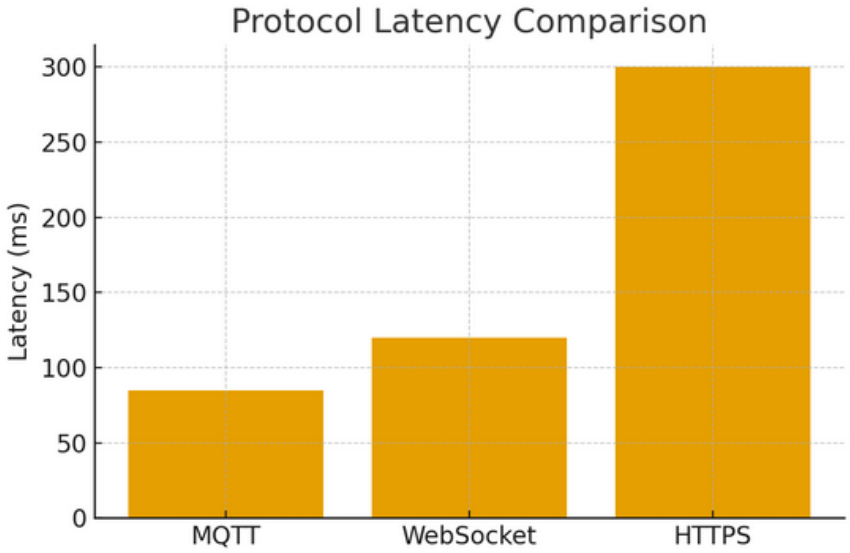


Рисунок 2 – Порівняльна діаграма затримок протоколів MQTT, HTTPS та WebSocket

Як бачимо, порівняння затримки трьох основних протоколів дає наступні результати – MQTT має найменшу затримку (середнє 85 мс), WebSocket – 120 мс, HTTPS – 300 мс.

Висновки. Запропонований варіант побудови системи віддаленого керування розумним будинком на основі мобільного застосунку дозволяє реалізувати ключові функції сучасної автоматизації житла, включаючи:

- моніторинг параметрів у реальному часі;
- безпечну передачу даних через MQTT/HTTPS;
- гнучке керування освітленням, опаленням та системами безпеки;
- використання сценаріїв для енергоефективних режимів;
- інтеграцію з локальним шлюзом (Raspberry Pi/STM32);
- підтримку автономної роботи системи при втраті Інтернету.

Результати підтверджують практичну значущість розробленого застосунку, який може застосовуватися в індивідуальних житлових будинках, квартирах, офісних приміщеннях та бути основою для розширення функціональності у межах концепції «розумного міста».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Kuznetsov, P. Development and implementation of a smart home automation system in the context of the Ukrainian housing sector: Challenges and prospects. Bulletin of Cherkasy State Technological University, Vol. 29 (1), 2024, pp. 62-72.

2. Sergiy Pasichnyk. Mobile Application Interface for Device Management in the Smart Household System/ Volume 14, 2023. pp. 312 – 326. doi:10.23939/sisn2023.14.312.

3. Vardakis, G. et al. *Review of Smart-Home Security Using the Internet of Things.* Electronics, *13*(16). 3343p. 2024. doi.org/10.3390/electronics13163343.

4. Aydin, A.A., Erzi, H.M. *IoT Based Mobile Smart Home Surveillance Application*. 2020 doi:10.1109/ISMSIT50672.2020.9255303.

5. Papova, S. *Application of the Smart House System for Reconstruction of Residential Buildings* from an Obsolete Housing Stock. *Smart Cities* 2023, *6*(1), pp.57-71. doi:10.3390/smartcities6010004.

6. Zia, M. F., Siddiqua, M., Ouameur, M. A., Bagaa, M., Al Turjman. Securing the Future: A Survey on Smart Home Security in IoT-Integrated Smart Cities. Adwances in Networks.12(1), 2025. pp.1-18. doi:10.11648/j.net.20251201.11.

УДК 66.021:681.5

Цьома О. В., Федік Л. Ю., Смолянкін О. О.
Луцький національний технічний університет

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА СУЛЬФОАМОФОСУ

У статті розглянуто питання автоматизації технологічного процесу виробництва сульфоамофосу – складного мінерального добрива, що містить азот і фосфор у доступній для рослин формі. Описано основні стадії виробництва (нейтралізація, доаммонізація, гранулювання, сушіння) та визначено критичні технологічні параметри – температуру, тиск, витрату реагентів, рівень і концентрацію, які потребують багатоканального автоматизованого контролю. Проведено аналіз процесу як об'єкта керування, виділено вхідні, вихідні та збурюючі параметри, показано вплив екзотермічного характеру реакцій і стохастичних властивостей гранулювання та сушіння на вибір методів регулювання. Сформульовано вимоги до системи автоматизації: підтримання сталих режимів, точне дозування реагентів, сигналізація рівня речовин, реєстрація та архівування даних. Обґрунтовано необхідність застосування адаптивних методів керування та перспективність впровадження сучасних цифрових технологій.

Ключові слова: сульфоамофос, автоматизація, технологічний процес, параметри, система керування, добрива.

Tsioma O. V., Fedik L. Yu., Smolyankin O. O. Aautomation of the technological process of sulphoammonium phosphate production. The article addresses the automation of the technological process for producing sulfoammophos, a complex mineral fertilizer containing nitrogen and phosphorus in plant-available forms. The main production stages–neutralization, additional ammoniation, granulation, and drying–are described, and critical technological parameters (temperature, pressure, reagent flow rates, level, and concentration) requiring multichannel automated control are identified. The process is analyzed as a control object, with input, output, and disturbance parameters distinguished, highlighting the impact of the exothermic nature of reactions and the stochastic properties of granulation and drying. Requirements for the automation system are formulated, including stable regime maintenance, precise reagent dosing, level signaling, and data registration. The necessity of applying adaptive control methods and the prospects of implementing modern digital technologies have been substantiated.

Keywords: sulfoammophos, automation, technological process, parameters, control system, fertilizers.

Постановка проблеми. Хімічна промисловість має важливе значення для сільського господарства, оскільки забезпечує його добривами та сприяє підвищенню врожайності. Одним із найпоширеніших добрив є сульфоамофос. Основне завдання його виробництва полягає у забезпеченні стабільності процесів та високої якості кінцевого продукту, при цьому важливо зменшувати витрати енергії, уникати можливих аварій та впроваджувати автоматизацію виробництва. Автоматизовані системи дозволяють оптимізувати технологічні операції, підвищити ефективність контролю й зменшити ризики, що сприяє більш безпечному та економічному функціонуванню підприємств [1-3].

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється питанням автоматизації та оптимізації технологічних процесів у хімічній промисловості, зокрема у виробництві мінеральних добрив.

Дослідники Федік Л. Ю. та Смолянкін О. О. роблять основний акцент на системах керування технологічними процесами. Їхні роботи присвячені розробці комп'ютерно-інтегрованих систем, які забезпечують багатоканальний контроль параметрів (температури, тиску, витрати реагентів). Вони наголошують на важливості використання адаптивних регуляторів та цифрових двійників для підвищення точності керування й стабільності виробництва [7].

А Корнієнко Б. Я. та Нікітюк М. В. зосереджують увагу на оптимізації технологічних процесів. Наукові праці авторів присвячені розробці систем управління гранулюванням у псевдозрідженому шарі та застосуванню нечітких регуляторів у виробництві добрив. Основна мета полягає у підвищенні ефективності процесів шляхом оптимізації параметрів і зниження енергетичних витрат [4; 5].

Наукові розробки Загірняка Д. М. та Стефківської Ю. В. роблять акцент на інноваційному розвитку та інтеграції сучасних технологій у виробництво добрив. Їхні дослідження присвячені впровадженню концепції Індустрії 4.0, цифрових технологій та міжнародних стандартів. Автори розглядають автоматизацію не лише як технічний інструмент, а й як стратегічний чинник підвищення конкурентоспроможності підприємств на глобальному ринку [3].

Автоматизація виробництва сульфоамофосу сприяє підвищенню продуктивності, зменшенню витрат та забезпеченню безпеки персоналу. Тема дослідження має практичне значення для вдосконалення технологічних процесів, підвищення їх ефективності та безпеки [5-7].

Мета роботи. Метою статті є аналіз технологічного процесу виробництва сульфоамофосу як об'єкта керування, визначення його ключових параметрів та формулювання вимог до системи автоматизації, що забезпечує стабільність, ефективність та високу якість кінцевого продукту.

Викладення основного матеріалу.

Для глибшого розуміння особливостей автоматизації виробництва необхідно розглянути технічну характеристику об'єкта, зокрема його фізико-хімічні властивості, які визначають умови перебігу технологічних процесів та вимоги до системи керування.

Сульфоамофос належить до складних водорозчинних мінеральних добрив, що поєднують у собі дві основні діючі речовини – азот і фосфор. Така комбінація забезпечує високу агрономічну ефективність, оскільки обидва елементи перебувають у формах, доступних для засвоєння рослинами.

Основу добрива становить моноамонійфосфат ($NH_4H_2PO_4$), який визначає його головні властивості. У складі також присутній діамонійфосфат ($(NH_4)_2HPO_4$), вміст якого не перевищує 10%. Саме ця пропорція забезпечує оптимальний баланс між кислотністю та лужністю середовища, що важливо для стабільності технологічного процесу.

До ключових фізико-хімічних характеристик належать:

1. Гігроскопічність: амофос відноситься до негігроскопічних речовин, що спрощує його транспортування та зберігання. Гігроскопічна точка при вологості до 1% становить 75% відносної вологості повітря;
2. Насипна маса: коливається в межах 0,98–1,05 т/м³, що визначає умови фасування та логістики;
3. Розчинність: при температурі 25 °C становить 26 г на 100 г води, що свідчить про високу швидкість розчинення у ґрунтовому середовищі;
4. Температура плавлення: дорівнює 190 °C, що важливо для вибору режимів сушіння та гранулювання.

Таким чином, фізико-хімічні властивості сульфоамофосу визначають не лише його агрономічну цінність, але й технологічні параметри виробництва. Вони безпосередньо впливають на вибір режимів автоматизації, адже стабільність температури, вологості та концентрації є критично важливими для отримання якісного кінцевого продукту [5-6].

Вивчення фізико-хімічних властивостей сульфоамофосу дозволяє зрозуміти його поведінку під час виробництва та визначити ключові параметри, які необхідно контролювати. А завдяки розгляду технологічного процесу виробництва - формуються кінцеві характеристики добрива та визначення вимог до системи автоматизації.

Першою стадією виробництва ульфоамофосу є нейтралізація екстракційної фосфорної кислоти рідким аміаком. Процес відбувається у спеціальному реакторі та супроводжується екзотермічною реакцією, що призводить до інтенсивного виділення тепла та випаровування води. Для забезпечення стабільності технологічного режиму необхідно підтримувати мольне співвідношення NH_3/H_3PO_4 на рівні не більше 0,75.

На другій стадії здійснюється доаммонізація пульпи у трубчастому реакторі-нейтралізаторі. Газоподібний аміак подається після випаровування та нагрівання до температури 110–140 °C. Важливим параметром є мольне співвідношення NH_3/H_3PO_4 у шихті, яке повинно становити 1,05–1,25. Це забезпечує оптимальний склад продукту та стабільність подальших стадій.

Отримана пульпа надходить у гранулятор, де відбувається формування гранул. Процес базується на багаторазовому обволіканні рециркульованого продукту (ретуру) рідкою фазою. Завдяки цьому гранули поступово збільшуються у розмірі та набувають необхідної міцності. Газова фаза, що утворюється у грануляторі, містить водяну пару, аміак та домішки, і підлягає очищенню в абсорбері.

Заключним етапом є сушіння гранул у барабанній сушарці, яка працює за принципом прямотоку. Тривалість сушіння становить близько 25 хвилин. Важливим показником є кінцева вологість продукту, яка не повинна перевищувати 1,5%. Це гарантує стабільність гранул при транспортуванні та зберіганні [4-6].

Таким чином, технологічний процес виробництва сульфоамофосу складається з чотирьох основних стадій – нейтралізації, доаммонізації, гранулювання та сушіння. Кожна з яких має свої критичні параметри, що потребують точного контролю та автоматизації для забезпечення високої якості кінцевого продукту. Крім цього демонструють складність і багатофакторність технологічного процесу. Кожна з них має свої критичні умови, від яких залежить якість кінцевого продукту. Тому для забезпечення стабільності виробництва та ефективної автоматизації необхідно визначити та контролювати ключові технологічні параметри, що формують основу системи керування.

У виробництві сульфоамофосу контроль технологічних параметрів є визначальним чинником, оскільки процеси відбуваються за участю токсичних і вибухонебезпечних речовин та супроводжуються екзотермічними реакціями. А автоматизовані системи керування забезпечують стабільність і безпеку виробництва, знижуючи ризики аварійних ситуацій. Основні параметри, що підлягають автоматизованому контролю, наведені у таблиці 1 [5; 6; 10].

Таблиця 1 – Основні параметри автоматизованого контролю у виробництві сульфоамофосу

Параметр	Характеристика та значення	Значення для процесу
Температура	Вимірюється на всіх стадіях: нейтралізатор (110–130 °C), випарник (110–140 °C), сушильний барабан (300–390 °C)	Відхилення від меж може спричинити аварії, тому автоматичне регулювання є критично важливим
Тиск	Контролюється у системі подачі газоподібного аміаку (1,3–1,6 МПа).	Стабільність тиску забезпечує правильний перебіг реакцій та безпеку обладнання.
Витрата реагентів	Фосфорна кислота (95–100 т/год), сірчана кислота (50–52 т/год), аміак (7–8 т/год)	Точне дозування визначає якість кінцевого продукту та економічність виробництва
Рівень у апаратах	Контроль рівня у нейтралізаторі та резервуарах	Запобігає переповненню та порушенню безперервності процесу
Концентрація речовин	Визначає хімічний склад добрива та його агрономічну ефективність	Автоматичні системи аналізу підтримують необхідні значення у режимі реального часу

Значення основних показників, допустимі відхилення, місця контролю та види автоматизованого керування під час контролю параметрів виробництва сульфоамофосу наведено у таблиці 2 [5; 6; 8].

Таблиця 2 – Технологічні параметри та види їх контролю у виробництві сульфоамофосу

Технологічний параметр	Значення	Відхилення	Місце контролю	Контроль	Реєстрація	Сигналізація	Регулювання
Температура пульпи	110–130 ˚С	± 1,5%	Нейтралізатор	+	+	+	–
Температура топкових газів	300–390 ˚С	± 1,5%	Сушильний барабан	+	+	–	–
Температура	20–30 ˚С	± 1,5%	Охолоджувач	+	+	–	–
Температура	110–140 ˚С	± 1,5%	Випаровувач	+	+	–	–
Тиск газоподібного аміаку	1,3–1,6 МПа	± 3%	На виході з охолоджувача рідкого аміаку	+	+	–	–
Тиск	1,3–1,6 МПа	± 3%	На вході в гранулятор	+	+	+	–
Витрата фосфорної кислоти	95–100 т/год	± 5%	На виході в бак фосфорної кислоти	+	+	–	–
Витрата сірчаної кислоти	50–52 т/год	± 5%	На вході в бак сірчаної кислоти	+	+	–	–
Витрата аміаку	7–8 т/год	± 5%	На вході в швидкісний реактор	+	+	–	+
Витрата пульпи фосфатів	8–10 т/год	± 5%	На вході в трубчастий реактор	+	+	–	+
Витрата фосфорної кислоти	55–65 м³/год	± 5%	На вході в трубчастий реактор	+	+	–	+
Витрата рідкого аміаку	4–5 м³/год	± 5%	На вході в трубчастий реактор	+	+	–	+
Витрата сірчаної кислоти	8–10 м³/год	± 5%	На вході в трубчастий реактор	+	+	–	+
Витрата газоподібного аміаку	1–3 т/год	± 5%	На вході в швидкісний реактор	+	+	–	+

Таким чином, параметри технологічного процесу виступають керованими змінними, що визначають ефективність і безпеку виробництва сульфоамофосу. Їх точний контроль і регулювання є необхідною умовою для впровадження сучасних систем автоматизації та цифрових технологій у хімічній промисловості, забезпечуючи стабільність процесів і високу якість кінцевого продукту.

Визначені технологічні параметри – температура, тиск, витрата реагентів, рівень та концентрація – формують основу для керування процесом виробництва сульфоамофосу. Однак сам факт їхнього вимірювання не гарантує стабільності виробництва. Для досягнення високої якості продукції та безпеки технологічного обладнання необхідно розробити комплексну систему автоматизації, яка забезпечить підтримання цих параметрів у заданих межах. Саме тому потрібно сформулювати вимоги до системи автоматизації.

Система автоматизації виробництва сульфоамофосу повинна відповідати таким ключовим вимог, що забезпечують ефективність та безпеку технологічного процесу:

1. Автоматичне підтримання температурних режимів: контроль у нейтралізаторі, випарнику, охолоджувачі та сушильному барабані; датчики та регулятори реагують на найменші відхилення від заданих значень;

2. Автоматичне регулювання тиску: у системі випарника та на вході в гранулятор; стабільність тиску гарантує безпечний перебіг реакцій і запобігає аваріям;

3. Автоматизоване дозування реагентів: контроль витрати фосфорної та сірчаної кислот, аміаку та пульпи; точне дозування забезпечує оптимальний склад добрива та економію ресурсів;

4. Сигналізація рівня речовин у резервуарах: попередження про переповнення або критичне зниження рівня; запобігання порушенню безперервності процесу;

5. Комплексний контроль концентрацій: автоматичні аналізатори здійснюють постійний моніторинг складу реагентів і продукту; гарантується стабільність агрономічних властивостей добрива;

6. Реєстрація та архівування даних: усі параметри зберігаються у цифровому вигляді для подальшого аналізу; створюється основа для впровадження інтелектуальних систем керування та прогнозування [7; 8-10].

Таким чином, вимоги до системи автоматизації охоплюють як технічні аспекти (контроль температури, тиску, витрат), так і організаційні завдання (сигналізація, реєстрація, аналітика). Їх виконання забезпечує стабільність виробництва, високу якість сульфоамофосу та безпеку персоналу.

Проте для побудови ефективної системи керування недостатньо лише визначити параметри та режими – важливо розглянути сам технологічний процес як об’єкт керування, з його вхідними, вихідними та збурюючими параметрами. Такий аналіз дозволяє створити адекватні моделі регулювання та обґрунтувати вибір методів автоматизації.

Виробництво сульфоамофосу є багатопараметричним процесом, що поєднує складні фізико-хімічні явища та потребує багатоканального контролю. Для ефективного керування виділяють три групи параметрів:

1. Вхідні – витрата фосфорної та сірчаної кислот, абсорбційної рідини, аміаку, а також напруга на нагрівальних елементах;

2. Вихідні – рівень у нейтралізаторі, температура в апаратах, якість гранульованого продукту;

3. Збурюючі впливи – температура навколишнього середовища та якість сировини, що не регулюються безпосередньо, але мають враховуватися у системі автоматизації [5-7].

Технологічний процес виробництва сульфоамофосу є багатопараметричним і динамічним об’єктом керування, що потребує багатоканального контролю. Зміна будь-якого вхідного параметра може спричинити відхилення вихідних характеристик, тому система автоматизації повинна оперативно реагувати на такі зміни. Особливу увагу слід приділяти екзотермічному характеру реакцій, який зумовлює необхідність постійного контролю температури та тиску. Процеси гранулювання й сушіння мають стохастичні властивості, пов’язані з неоднорідністю гранул, що потребує застосування адаптивних методів керування [4; 5; 7].

Таким чином, аналіз технологічного процесу як об’єкта керування дозволяє визначити його структуру, параметри та зовнішні впливи. Це створює основу для побудови ефективної системи автоматизації, яка забезпечує стабільність виробництва, високу якість добрив та безпеку технологічного обладнання.

Висновки. Сульфоамофос є складним багатопараметричним об’єктом виробництва, фізико-хімічні властивості якого визначають вимоги до системи автоматизації. Технологічний процес включає основні стадії – нейтралізацію, доаммонізацію, гранулювання та сушіння, що потребують точного контролю критичних параметрів. Стабільність і якість продукту забезпечуються автоматизованим регулюванням температури, тиску, витрат реагентів, рівня та концентрації, із застосуванням багатоканального й адаптивного керування. Подальший розвиток автоматизації

виробництва пов’язаний із впровадженням цифрових технологій (систем прогнозування, цифрових двійників, концепції Індустрії 4.0), що підвищує ефективність і конкурентоспроможність продукції.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Герасимчук А. В., Федік Л. Ю., Смолянкін О. О., Маркіна Л. М. Технологічний процес виділення ізобутилену як ключового продукту нафтохімії: огляд і перспективи автоматизації систем контролю і регулювання технологічних параметрів. Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Актуальні проблеми автоматизації та керування». Луцьк: ЛНТУ, 2024. Issue 12. С. 37-40. URL: http://av.lntu.edu.ua/images/im_2013/konference_2024.pdf (дата звернення: 26.11.2025).

2. Гуменюк П. О., Гуменюк Л. О., Пальчевський Б. О., Решетило О. М., Смолянкін О. О., Федік Л. Ю. Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології: магістерський курс для освітньої програми «Системи керування та діагностування технологічного устаткування». Луцьк: ЛНТУ, 2024. 205 с. URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2024-08/%D0%9F%D0%9E%D0%A1%D0%86%D0%91%D0%9D%D0%98%D0%9A%20%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D1%96%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B8.pdf (дата звернення: 26.11.2025).

3. Загірняк Д. М., Стефківська Ю. В. Дослідження перспектив інноваційного розвитку вітчизняних виробників добрив в умовах міжнародної інтеграції. Кременчук: КрНУ, 2025. 309 с. URL: https://www.kdu.edu.ua/Documents/diser_Stefkivska.pdf (дата звернення: 26.11.2025).

4. Корнієнко Б. Я., Нестерук А. О. Система управління виробництвом гранульованих мінеральних добрив у псевдозрідженому шарі. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. С. 133-139. URL: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2023/5_2023/22.pdf (дата звернення: 26.11.2025).

5. Нікітюк М. В. Система управління виробництвом мінеральних добрив. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 67 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstreams/d85614e3-f2fa-4f58-a667-fa9d71bcbdc7/download (дата звернення: 26.11.2025).

6. Прищепа М. С., Федік Л. Ю. Аналіз технологічного процесу виробництва аміаку для обґрунтування завдань його автоматизації. Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Актуальні проблеми автоматизації та керування». Луцьк: ЛНТУ, 2023. Вип. №11. С. 69-73. URL: http://av.lntu.edu.ua/images/im_2013/konf_2023.pdf (дата звернення: 26.11.2025).

7. Смолянкін О. О., Федік Л. Ю. Аналіз технологічного процесу отримання карбаміду як об’єкта керування. Перспективні технології та прилади. Луцьк: ЛНТУ, 2022. Вип. 21. С. 119-124. DOI: https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2022-21-18 (дата звернення: 26.11.2025).

8. Федік Л. Ю., Сіваковська О. М. Особливості застосування комп’ютерних технологій під час автоматизації виробничих процесів. Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Актуальні проблеми автоматизації та керування». Луцьк: ЛНТУ, 2023. Вип. №11. С. 42-48. URL: http://av.lntu.edu.ua/images/im_2013/konf_2023.pdf (дата звернення: 26.11.2025).

9. Черняк С., Федік Л. Заземлення, як метод захисту електроустановок під час монтажу засобів автоматизації. Матеріали конференцій МНЛ (17 червня 2022 р., м. Івано-Франківськ). С. 117-120. URL: https://archive.liga.science/index.php/conference-proceedings/article/view/90 (дата звернення: 26.11.2025).

10. Шевченко В. В., Тимчик Г. С. Основи автоматизації технологічних процесів: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 111 с. URL: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/97358d2f-ecf9-44a1-a78f-6510ffef424c/content (дата звернення: 26.11.2025).

УДК 519.688:531.16
Шабанов Г.В.[1], Андрєєв Ю.М[2]
[1] аспірант кафедри КМПС, НТУ «ХПІ», Харків, Україна
Hennadii.Shabanov@infiz.khpi.edu.ua
[2] професор кафедри КМПС, д-р техн. наук, НТУ «ХПІ», Харків, Україна
Yurii.Andrieiev@khpi.edu.ua

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ І МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

Анотація. У роботі автори докладу Шабанов Г.В. та Андрєєв Ю.М. пропонують розглянути практичну реалізацію алгоритмів побудови траєкторії та оберненої кінематики шестиступеневого робота-маніпулятора на прикладі ABB та PUMA 560. Математичну основу сформовано у ССКА «КіДиМ» [4], де виведено та протестовано рівняння прямих і обернених перетворень, визначено сингулярні зони та сформовано залежність від параметрів Денавіта–Хартенберга. Створений алгоритм інтегровано у систему RoboControl з ядром на C++ та підтримкою Python, реалізовано дискретну побудову траєкторій, фільтрацію кутів та візуалізацію руху в OpenGL у реальному часі. Розробка може використовуватися для навчальних, дослідницьких і прикладних задач у галузі робототехніки.

Ключові слова: моделювання, робототехніка, промисловий робот, параметри Денавіта–Хартенберга, обернена кінематика, траєкторія руху

Abstract. In this work, the authors H. Shabanov and Yu. Andrieiev present a practical implementation of trajectory generation and inverse kinematics algorithms for a six-degree-of-freedom robotic manipulator, demonstrated using ABB and PUMA 560 models. The mathematical framework was developed in the specialized computer algebra system (SCAS) KiDyM [4], where forward and inverse transformation equations were derived and validated, singularity regions were identified, and relationships based on Denavit–Hartenberg parameters were established. The resulting algorithm was integrated into the RoboControl environment featuring a C++ computational core and Python scripting support. The system implements discrete trajectory planning, joint-angle smoothing, and real-time OpenGL-based visualization. The solution may be applied for educational, research, and industrial robotics development.

Keywords: simulation, robotics, industrial robot, Denavit–Hartenberg parameters, inverse kinematics, trajectory planning.

1. Вступ

Автоматизація виробничих процесів та розвиток інтелектуальних систем керування призвели до широкого застосування роботизованих комплексів у промисловості, медицині, логістиці та наукових дослідженнях. Однією з ключових задач сучасної робототехніки є побудова керованого руху маніпулятора з урахуванням кінематичних обмежень, уникненням сингулярностей та забезпеченням плавності руху. Подібні задачі розглянуті у фундаментальних робототехнічних працях [1–3], де акцент зроблено на математичні моделі, параметризацію Денавіта–Хартенберга та побудову рівнянь прямої й оберненої кінематики.

Задача оберненої кінематики є фундаментальною, оскільки дозволяє переходити від задачі позиціонування інструмента до визначення конфігурації окремих ланок маніпулятора. Для шести ступенів свободи існує множинність можливих розв'язків, про що згадується у класичних джерелах [1,2], де показано, що область допустимих конфігурацій визначається як геометричними властивостями маніпулятора, так і режимами його роботи.

У нашій роботі використано математичний підхід, узгоджений із методологією, наведеною у [1–3], але адаптований під конкретні роботизовані платформи ABB та PUMA 560. Це дозволило отримати аналітичні формули для обчислення положення та орієнтації інструмента відносно параметрів Денавіта–Хартенберга, що відповідає теоретичним принципам та узгоджується з міжнародними рекомендаціями, описаними у [1].

2. Основна частина

2.1 Математична модель та символьне виведення формул

Для формування математичної моделі використано параметризацію Денавіта–Хартенберга. На основі цих параметрів у спеціальній системі комп'ютерної алгебри КіДиМ було сформовано послідовність матричних перетворень, що описують положення кінцевого виконавчого пристрою:

$$T = A_1(q_1)A_2(q_2)A_3(q_3)A_4(q_4)A_5(q_5)A_6(q_6)$$

У середовищі КіДиМ автоматизовано:
- генерацію матриць перетворень,
- спрощення виразів;

Це дозволило аналітично виділити області, у яких алгоритм потребує корекції.

2.2 Програмна реалізація

Одним із критичних аспектів задачі оберненої кінематики є виявлення та обробка сингулярних конфігурацій маніпулятора. У теоретичних працях [1–3] наголошено, що сингулярність виникає тоді, коли система втрачає один або більше ступенів свободи, а матриця Якобіана стає виродженою. Формально це означає:

$$det\big(J(q)\big) = 0$$

де J(q) — матриця часткових похідних, що описує залежність лінійних та кутових швидкостей енд-ефектора від швидкостей суглобів.

У загальному випадку Якобіан робота з шістьма ступенями свободи представлено як:

$$J(q) = \begin{bmatrix} \frac{\delta x}{\delta q_1} & \frac{\delta x}{\delta q_2} & \cdots & \frac{\delta x}{\delta q_6} \\ \frac{\delta y}{\delta q_1} & \frac{\delta y}{\delta q_2} & \cdots & \frac{\delta y}{\delta q_6} \\ \frac{\delta z}{\delta q_1} & \frac{\delta z}{\delta q_2} & \cdots & \frac{\delta z}{\delta q_6} \\ \frac{\delta \alpha}{\delta q_1} & \frac{\delta \alpha}{\delta q_2} & \cdots & \frac{\delta \alpha}{\delta q_6} \\ \frac{\delta \beta}{\delta q_1} & \frac{\delta \beta}{\delta q_2} & \cdots & \frac{\delta \beta}{\delta q_6} \\ \frac{\delta \gamma}{\delta q_1} & \frac{\delta \gamma}{\delta q_2} & \cdots & \frac{\delta \gamma}{\delta q_6} \end{bmatrix}$$

де x,y,z — лінійні координати енд-ефектора, а α, β, γ — орієнтаційні параметри (Euler / RPY залежно від формалізму).

Аналіз сингулярностей на символьному рівні є надзвичайно складним, оскільки визначник матриці Якобіана для шести ступенів свободи — це громіздкий вираз високого ступеня складності 2. Практично спрощення аналітичного вигляду часто неможливе або не дає інтерпретованого результату. Тому у даній роботі застосовано гібридний підхід:

1. попередній символьний аналіз у системі KiDиM дозволив виділити ключові геометричні сингулярні позиції (наприклад, коли осі суглобів накладаються або вирівнюються);
2. числовий аналіз у реальному часі використовується в RoboControl для оцінки поточного стану:
   $\left|\det(J(q))\right| < \varepsilon$

де ε — адаптивний поріг, що залежить від швидкості руху й точності розрахунку.

При наближенні до критичної зони спрацьовує корекційний модуль, який змінює швидкість суглобів, обмежує розв'язок або модифікує траєкторію, що відповідає практичним рекомендаціям з [1,3].

Таким чином, система не лише обчислює обернену кінематику, але й гарантує клієнту керований та стабільний рух, навіть у складних конфігураціях, де аналітичний підхід без додаткової валідації є нестійким.

Отримані формули реалізовано у розробленій програмі RoboControl, де обчислювальні модулі написано на C++. Система підтримує динамічне керування через Python-сценарії.
У процесі побудови траєкторії реалізовано:

- дискретизацію шляху, за допомоги розрахунку точок на кубічній кривій Безьє проведеній між реперними точками;
- обчислення кутів суглобів за допомоги модифікованого алгоритму оберненої кінематики;
- згладжування фільтром для симуляції більш плавного руху, так як система рухається через дискретні точки, необхідна апроксимація на дискретних ділянках.
- контроль обмежень конфігурації, завдяки обчисленню геометричних обмежень конструкції. Наприклад виродження в пряму лінію, або «складання» двох вузлів на край малий кут.

Траєкторія представлена як набір опорних точок, сформованих користувачем та побудованої апроксимації траєкторії між цими точками за допомоги сплайну Безьє. Користувачу необхідно лише задати ці опорні точки в світових координатах. Таким чином можна побудувати шлях оминаючи перешкоди, а також візуально оцінити його коректність.

2.3 Візуалізація та взаємодія у реальному часі

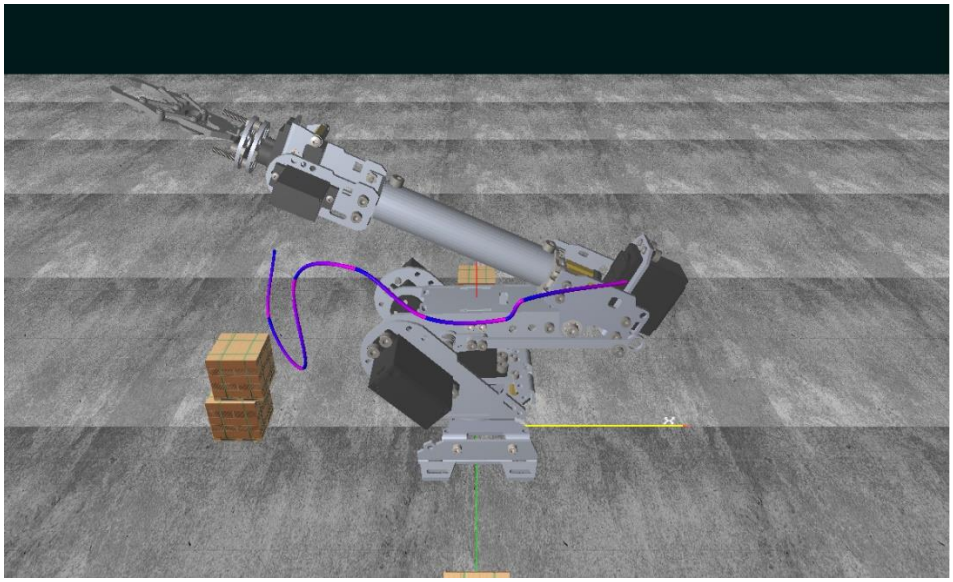
Для візуалізації використано OpenGL 3.3. Геометричні шейдери дозволили передавати траєкторії як об’ємні трубчасті структури та вектори руху. Які дозволяють вказувати шлях руху зручним чином, а також додавати і керувати відображенням службової інформації, наприклад розташування геометричних центрів або проміжні результати обчислень. Також, ці вектори планується використати для відображення динамічних векторів сил.

Для більшої зручності математична частина винесена окремо і керується за допомоги мови Python, що дозволяє у подальшому дати підґрунтя для створення динамічної системи керування без суттєвих змін у основну програмну реалізацію. Тобто, сформована гнучка система по рішенню математичних задач моделювання без занадто серйозного заглиблення у основи рендерингу та формуванню об’ємних фігур комп’ютерної графіки.

На поточний час, для користувача, який бажає додати зміни, сформовано зручний інтерфейс взаємодії через інтерфейс, який дозволяє:

- вказати кут повороту ланки, або при необхідності отримати результуючий;
- перевірити, чи вказані ним дані не виходять за кінематичні обмеження системи;
- змінити або задати шлях;
- додати свою мікропрограму керування;

Так як програма має інтерфейс взаємодії з фізичним роботом, це дозволяє моделювати його рух, як з реальним механізмом, так і в відокремленому режимі. Отже, мікропрограму можна розробити дистанційно, а в подальшому передати на фізичний механізм, що серйозно поліпшує якість і швидкість розробки.



Демонстраційний приклад роботи програми

3. Висновки

Розроблений алгоритм продемонстрував можливість інтеграції аналітичних формул оберненої кінематики у прикладне середовище симуляції руху роботів. Використання системи КіДиМ забезпечило математичну точність, а RoboControl — гнучкість, модульність та можливість візуального контролю. Подальші дослідження планується спрямувати на додавання динамічної моделі руху, оптимізацію енергоспоживання та застосування алгоритмів машинного навчання для самонавчальних систем керування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Spong, M.W., Hutchinson, S., Vidyasagar, M. Robot Modeling and Control. 2nd Edition. Wiley, 2020. ISBN 978-1119523994.
2. Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., Oriolo, G. Robotics: Modelling, Planning and Control. Springer, 2010. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1
3. Craig, J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 4th Edition. Pearson, 2020.
4. Shabanov H., Andrieiev Y. System KiDiM: Symbolic Mechanics Engine Documentation. Internal Technical Report, NTU “KhPI”, 2024.

СЕКЦІЯ «АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ У СФЕРІ ОСВІТИ, НАУКИ ТА ВИРОБНИЦТВА»

УДК 681.5
Голіков Т. Ю.
Луцький національний технічний університет

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ПОШИВУ СОРОЧОК

У роботі описано основні етапи процесу автоматизованого виробництва сорочок. Виконано аналіз технологічного процесу як об'єкта керування. Завдяки цьому аналізу виробничий процес стає не просто серією технологічних операцій, а системою, здатною до самоконтролю, оптимізації та адаптації до мінливих умов – ключових принципів сучасного інтелектуального виробництва. Визначено параметри технологічного процесу виробництва сорочок, які необхідно контролювати. Визначено задачі автоматизації технологічного процесу виробництва сорочок.
Ключові слова: автоматизоване виробництво сорочок, технологічні параметри, керування, інтелектуальне виробництво.

Holikov T. Automated system for controlling the technological process of shirt sewing. The paper describes the main stages of the automated shirt production process. The analysis of the technological process as a control object is performed. Thanks to this analysis, the production process becomes not just a series of technological operations, but a system capable of self-control, optimization and adaptation to changing conditions - the key principles of modern intelligent production. The parameters of the technological process of shirt production that need to be controlled are determined. The tasks of automating the technological process of shirt production are determined.
Keywords: automated shirt production, technological parameters, control, intelligent production.

Постановка проблеми. В останні роки швейна промисловість, зокрема виробництво одягу, стикається з низкою критичних викликів, які вимагають переходу до повної інтелектуальної автоматизації.

1. Надмірна трудомісткість та низька ефективність традиційних методів. Виготовлення одягу досі значною мірою залежить від ручної праці або напівавтоматизованих машин, особливо на етапах роботи з м'якими, гнучкими матеріалами (тканиною). Це призводить до високих витрат на оплату праці, низької пропускної здатності та високої ймовірності людських помилок, які впливають на якість кінцевого продукту.

2. Фрагментація та ізольованість виробничих етапів. Сучасні автоматизовані системи (наприклад, лазерне різання, зшивання простих швів) функціонують як окремі, неінтегровані одиниці. Між етапами розкрою, пошиття та прасування матеріал часто потребує ручного втручання для переміщення, вирівнювання та підготовки. Ця відсутність наскрізної інтеграції створює "вузькі місця", збільшує час виробництва та знижує загальну гнучкість системи.

3. Складність роботи з м'якими та мінливими матеріалами. Автоматизація складних операцій, таких як пришивання коміра, манжетів, чи формування кишень, є особливо важкою. Тканина є гнучким, нежорстким матеріалом, що вимагає постійного контролю її положення та адаптації рухів робота/машини в реальному часі. Існуючі системи часто не здатні ефективно впоратися з цими варіаціями.

Таким чином, головна проблема, яку вирішує ця робота, полягає у необхідності розробки та впровадження інтегрованої, адаптивної та повністю автоматизованої системи для наскрізного процесу виготовлення одягу, що має замінити трудомісткі, роз'єднані та схильні до помилок традиційні методи.

Розробка автоматизованої системи пошиву сорочок є актуальною з ряду причин.

1. Процес пошиву сорочок є високочутливим до точності виконання операцій. Навіть незначні відхилення в кроці, натягу нитки або позиціонуванні деталей можуть істотно вплинути на якість швів, посадку виробу та зовнішній вигляд продукції. Тому автоматизація та точний контроль процесу мають вирішальне значення.

2. Автоматизовані системи з комп'ютерним зором забезпечують повторюваність технологічних параметрів, що є критично важливим для підтримання однакової якості продукції в усіх партіях. Це особливо актуально при роботі з м'якими, нежорсткими матеріалами, маніпуляція якими залишається невирішеною проблемою традиційної робототехніки.

3. Автоматизація зменшує кількість людських помилок та відходів матеріалів за рахунок оптимізації розкрою, використання тканини та часу виробництва. Вона дозволяє здійснювати наскрізну інтеграцію виробничого ланцюга – від розкрою до фінального прасування, що знижує виробничі витрати та мінімізує необхідність ручного переміщення матеріалу між операціями.

4. Сучасні системи керування можуть інтегруватися з цифровими виробничими платформами, що дозволяє збирати та аналізувати дані для оптимізації процесів. Модульність системи забезпечує гнучке переналаштування для різних моделей, розмірів і типів тканин.

5. Розвиток автоматизованого пошиву сорочок відповідає глобальному переходу до концепції Industry 4.0 та інтелектуального виробництва. Інтеграція комп'ютерного зору, адаптивних алгоритмів керування та роботизованих систем перетворює традиційне трудомістке виробництво на високотехнологічний, конкурентоспроможний процес.[1]

6. Автоматизація зменшує залежність від ручної праці, вирішуючи проблему нестачі кваліфікованих швачок та покращуючи точність виконання операцій. Крім того, інтелектуальний контроль якості та оптимізація використання матеріалів сприяють екологічній відповідальності виробництва.

Таким чином, розробка автоматизованої системи не тільки підвищує стабільність якості продукції та ефективність, але й сприяє цифровій трансформації у швейній промисловості, відповідаючи сучасним стандартам конкурентоспроможності та сталого розвитку.

Метою роботи є модернізація автоматизованої системи виготовлення сорочок.

Викладення основного матеріалу.

Процес ручного шиття – це кропітка багатокрокова робота, що поєднує технічні навички та уважність до деталей. Від вибору тканини та підготовки викрійок до формування точних стібків – кожен етап має вирішальне значення для міцності та естетики готового виробу. Якість результату – рівні шви, акуратні краї та гармонійна посадка по фігурі – залежить від ретельності виконання кожного руху й узгодженості дрібних, але важливих операцій.

Але сьогодні перевага надається стійким і надійним робочим процесам, в яких ефективно використовуються фізичні, хімічні, електрохімічні та інші явища у поєднанні зі спеціальними властивостями інструментів, технологічного середовища, наприклад, іонопроменева обробка або синтезування речовин. [2]

Оптимізація робочих процесів проводиться з метою мінімізації енергетичних і матеріальних витрат, трудовитрат, собівартості продукції. Для цього необхідні глибокі спеціальні дослідження у конкретній галузі, розробка автоматизованих систем наукового забезпечення. [2]

Процес можна розділити на такі основні етапи. [3]

1. Підготовка сировини та розкладка тканини є початковим підготовчим етапом у виготовленні одягу, під час якого кілька шарів матеріалу рівномірно та точно викладаються для подальшого розкрою. Цей етап є критичним, адже він безпосередньо впливає на раціональне використання тканини, однаковість деталей виробу та загальну ефективність виробництва. Щоб уникнути подальших деформацій чи нестабільності розмірів, часто рекомендується дати тканині «відпочити» (наприклад, залишити на ніч) перед розкладкою, аби внутрішні напруження — які можуть спричиняти усадку або деформацію — вивільнилися.

Розкладка може виконуватися вручну — зазвичай у невеликих майстернях або під час роботи з делікатними матеріалами — або за допомогою механізованих чи повністю автоматизованих систем. В автоматизованому методі синхронізовані приводи та регульовані системи натягу забезпечують рівномірність нашарування та натягнення полотна, що підвищує швидкість і точність процесу.

Під час розкладки необхідно враховувати напрям нитки, орієнтацію тканини та можливі дефекти. Для матеріалів із малюнком або спрямованою структурою вирівнювання шарів має забезпечувати відповідність між ними. Так само контроль натягу та використання відповідних столів або основ для розкладки (наприклад, вакуумних столів чи конвеєрів) допомагають уникнути зміщення й сповзання шарів, що може негативно вплинути на якість розкроєних деталей.

2. Після правильної розкладки та вирівнювання настил тканини піддається розкрою — процесу, що перетворює багатошаровий пласт тканини на окремі деталі згідно з попередньо створеним лекальним планом. Мета розкрою — точно відтворити форми та розміри лекальних

деталей, щоб отримані фрагменти добре поєднувалися під час збирання й забезпечували задуманий силует і посадку готового виробу.

Розкрій може виконуватися різними методами залежно від обсягу робіт, типу тканини та вимог до точності. Традиційний ручний розкрій — наприклад, ножицями — підходить для невеликої кількості шарів, але для великих настилів та серійного виробництва застосовують електроножі (прямолінійні або дискові), стрічкові ножі або повністю автоматизовані системи розкрою. У високотехнологічних виробничих середовищах можливе використання лазерного чи гідрорізання, особливо коли потрібна мінімальна деформація країв та висока точність.

Чисті, рівні краї без осипання мають ключове значення для якісного збирання та довговічності швейного виробу. Для цього ріжучі інструменти повинні бути гострими, настил — стабільно зафіксованим (часто за допомогою вакуумного притиску), а висота настилу — контрольованою, аби не погіршити якість нижніх шарів.

3. Перед початком розкладки тканина має пройти перевірку на наявність дефектів, плям, дірок або нерівностей переплетення, щоб проблемні ділянки можна було вилучити ще до розкрою. Під час розкладки та розкрою особливо важливо підтримувати стабільний натяг і точне вирівнювання шарів. Гострота та стан ножів, оптимальна висота настилу та допустима кількість шарів — це фактори, що впливають на якість розкрою, мінімізують дефекти та скорочують витрати матеріалу. Ефективне управління відходами — включно з повторним використанням або переробкою обрізків — додатково сприяє екологічності та економічності виробництва.

4. У технології виготовлення сорочок шиття становить ключовий етап складання, у межах якого двовимірні тканинні заготовки трансформуються у просторову конструкцію виробу. Якість виконання цього процесу визначається правильністю вибору швейного обладнання, параметрами формування стібків та раціональною послідовністю складальних операцій. Для з'єднання бокових і плечових ліній переважно застосовують човникові машини з прямим стібком (тип 301), що забезпечує міцний та збалансований шов для зон із підвищеним навантаженням. Обробка країв виконується оверлочною машиною з обметувальним стібком (504/514), який запобігає осипанню зрізів та формує охайний внутрішній вигляд. Декоративна та конструктивна відстрочка на комірах і манжетах здійснюється одно- або двоголковими машинами човникового чи ланцюгового стібка (301/401).

Показники якості стібка регулюються розміром, натягом нитки та вибором голки. Оптимальна густота для сорочкових виробів становить близько 8–12 стібків на дюйм, що гарантує міцність шва без надмірного його потовщення. Збалансований натяг нитки запобігає зморщуванню матеріалу та обривам, а тонкі голки розмірів 70/10 або 80/12 мінімізують ризик пошкодження легких тканин. Технологічна послідовність передбачає початкову підготовку малих компонентів: комірів, манжет і шліц рукавів шляхом дублювання, стачування, вивороту та прасування.

5. Прасування розглядається не лише як оздоблювальний етап, а як конструктивний процес формування, стабілізації та візуального удосконалення виробу. Його ефективність ґрунтується на поєднанні теплового впливу та механічного тиску: водяна пара розм'якшує волокна, після чого пресування закріплює тканину у заданій формі. Прасування здійснюється як під час складання сорочки, так і на завершальній стадії. На рівні окремих деталей (коміра, манжет, шліц та кокетки) обробка проводиться одразу після стачування для забезпечення чіткої форми і стабільності згинів. Під час складання шви розпрасовуються з метою зменшення товщини та забезпечення рівної посадки наступних елементів. Рукавні та бокові зони піддаються проміжному пресуванню для підтримання рівності та запобігання деформацій.

Фінальне прасування охоплює весь виріб і поєднує дію пари, температури та вакууму на прасувальних столах або у фінішних тунелях для вирівнювання поверхні й збереження просторової форми. Вибір устаткування залежить від ділянки виробу та властивостей тканини: для коміра та манжет застосовують парову праску або спеціальні преси, для рукавів — прес-колодки чи рукавні дошки, для корпусних деталей — вакуумні столи або пресові колодки. Контроль якості передбачає оцінку наявності зморшок, блиску, відбитків припусків і порушення форми.

6. Реалізація технології виготовлення сорочок передбачає інтеграцію швейних та прасувальних процесів у єдиний виробничий потік. Швейні операції оцінюються за трудомісткістю та раціонально розподіляються між робочими місцями для уникнення перевантаження окремих ділянок. Прасування вводиться на проміжних і завершальних етапах, виконуючи стабілізуючу функцію між елементами складання. Такий підхід забезпечує безперервність переміщення напівфабрикатів, підтримання точності розмірів та запобігання накопиченню дефектів.

Скоординована взаємодія операцій шиття та прасування забезпечує їхню функціональну взаємодоповнюваність та підвищує якість готового виробу.

Аналіз автоматизованого процесу шиття сорочок як об'єкта керування передбачає розгляд виробництва сорочок з точки зору теорії керування. Мета полягає у визначенні структури процесу, взаємозв'язків між вхідними та вихідними змінними, а також динамічних характеристик кожної операції для забезпечення розробки ефективної автоматизованої системи керування.

Такий підхід перетворює виробничу лінію з суто технологічної послідовності на керовану динамічну систему, де кожну операцію можна контролювати, регулювати та оптимізувати. Об'єктом керування може бути технологічна підсистема або набір операцій, параметри яких необхідно підтримувати для досягнення бажаної якості та ефективності процесу.

У автоматизованому виробництві сорочок об'єктами керування можуть бути:

- Система подачі та вирівнювання тканини – контролює швидкість подачі, натяг та точність вирівнювання.
- Операції шиття (панелі, комір, манжети) – контролюють довжину стібка, натяг нитки та швидкість шиття.
- Блоки контролю та обрізки швів – відстежують якість швів і виявляють дефекти.

Кожна підсистема може функціонувати як окремий контур керування або інтегруватися в єдину систему управління. Аналіз починається з визначення вхідних, вихідних та збурюючих змінних, що впливають на кожну операцію. Наступним кроком є визначення того, як вхідні змінні впливають на показники якості, що можна відобразити у вигляді структурних схем взаємозв'язків між процесами.

Кожен етап демонструє як статичну, так і динамічну поведінку.

Статичний аналіз визначає стаціонарні взаємозв'язки (наприклад, довжина стібка залежно від натягу нитки).

Динамічний аналіз оцінює часову реакцію на зміни параметрів, часто за допомогою диференціальних рівнянь або передавальних функцій (наприклад, зміна якості стібка при різких коливаннях швидкості подачі тканини).

Цілі керування зазвичай включають підтримку критичних параметрів (довжина стібка, натяг нитки, швидкість подачі) у оптимальних межах; мінімізацію відхилень від заданих показників якості (однорідність швів, точність вирівнювання деталей); максимізацію продуктивності при мінімізації витрат матеріалів та енергії.

Для автоматизації обирають відповідні датчики та виконавчі механізми: системи візуального контролю для вирівнювання, датчики натягу нитки, двигуни для подачі тканини та руху голки. Автоматизована система забезпечує безперервний моніторинг та регулювання критичних параметрів у реальному часі на всіх підсистемах.

Висновки. Описано етапи процесу автоматизованого виробництва сорочок. Кожен етап повинен ретельно контролюватися, щоб забезпечити точність обробки тканини, рівномірність швів та високу якість готового виробу. Виконано аналіз технологічного процесу як об'єкта керування. Завдяки цьому аналізу виробничий процес стає не просто серією технологічних операцій, а системою, здатною до самоконтролю, оптимізації та адаптації до мінливих умов – ключових принципів сучасного інтелектуального виробництва. Визначено параметри технологічного процесу виробництва сорочок, які необхідно контролювати. Визначено задачі автоматизації технологічного процесу виробництва сорочок.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Automated Sewing Systems. URL: https://www.mdpi.com/2076-3387/14/10/258 (дата звернення 26.11.2025).

2. Технологія виготовлення виробів з різних матеріалів: навчальний посібник. Київ: Бабич А.І., 2021. 250 с.

3. Apparel Manufacturing Technology. Florida, Karthik T., Ganesan P., Gopalakrishnan D., 2016. 502 с.

УДК 004.42:378.147.88
Домашенко А.О.
Луцький національний технічний університет
E-mail: domashenko.a1409.g7.25@lntu.edu.ua

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВСТУПНОЮ КАМПАНІЄЮ ЗАКЛАДУ ФАХОВОЇ ПЕРЕДВИЩОЇ ОСВІТИ

Автоматизована система управління вступною кампанією закладу фахової передвищої освіти. У роботі представлено розробку інтегрованої системи управління процесом вступу до ВСП «Ковельський промислово-економічний фаховий коледж ЛНТУ» з використанням мови програмування Python, СУБД SQLite та бібліотеки PyQt5. Проаналізовано недоліки існуючої системи на базі Microsoft Access, що призводять до втрати даних, складності використання та обмежених можливостей масштабування. Розроблена система забезпечує модульну архітектуру, включає функції реєстрації абітурієнтів, ведення особових справ, обліку пільг, формування звітності та друку документів. Реалізовано механізми авторизації з хешуванням паролів, автоматичну валідацію даних та резервне копіювання. Тестування підтвердило стабільність роботи при багатокористувацькому режимі. Результати впровадження демонструють підвищення продуктивності роботи приймальної комісії, зменшення кількості помилок та покращення прозорості вступних процедур.
Ключові слова: автоматизація вступної кампанії, інформаційна система, Python, SQLite, управління даними, фахова передвища освіта, приймальна комісія, модульна архітектура.

Domashenko A. Automated admission management system for vocational college. The paper presents development of integrated admission process management system for VSP "Kovel Industrial and Economic College of LNTU" using Python programming language, SQLite DBMS and PyQt5 library. Disadvantages of existing Microsoft Access-based system are analyzed, which lead to data loss, complexity of use and limited scalability. Developed system provides modular architecture, includes functions for applicant registration, personal file management, benefits accounting, reporting and document printing. Authorization mechanisms with password hashing, automatic data validation and backup are implemented. Testing confirmed system stability in multi-user mode. Implementation results demonstrate increased productivity of admission committee work, reduced number of errors and improved transparency of admission procedures.
Keywords: admission campaign automation, information system, Python, SQLite, data management, vocational education, admission committee, modular architecture.

Постановка проблеми. Традиційна організація вступної кампанії у закладах фахової передвищої освіти часто базується на паперовому документообігу та ручній обробці даних, що призводить до значних часових витрат, підвищеного ризику помилок і зниженої прозорості процедур. У ВСП «КПЕФК ЛНТУ» існуюча система на базі Microsoft Access демонструє критичні недоліки: часті збої під час пікового навантаження, складний інтерфейс, що ускладнює навчання персоналу, відсутність інструментів швидкого аналізу даних та обмежені можливості масштабування. Дослідження показало, що нестабільність роботи бази даних призводить до втрати введених даних або їхнього часткового пошкодження, особливо під час одночасної обробки десятків заявок. Складність інтерфейсу вимагає від новачків тижнів тренувань для освоєння базових операцій. [1]

Сучасні системи управління вступом зазвичай включають модулі для реєстрації абітурієнтів, обробки документів, формування рейтингових списків та генерації звітності. Однак більшість комерційних рішень мають жорстку архітектуру, високу вартість ліцензій, орієнтовані на класичні університети, не враховуючи специфіку закладів професійної освіти та обмежені можливості інтеграції з локальними системами.

Метою роботи є створення доступної, зручної та функціональної системи автоматизації вступної кампанії, що забезпечить: ефективну обробку заяв та персональних даних вступників автоматизацію формування особових справ та обліку пільг, генерацію необхідної звітної документації, зручний інтерфейс для персоналу приймальної комісії.

Для реалізації системи обрано клієнт-серверну модель з використанням мови програмування Python, СУБД SQLite та PyQt5. Вибір SQLite зумовлений простотою впровадження, відсутністю потреби в окремому сервері та достатньою продуктивністю для обсягу даних вступної кампанії. Python забезпечує швидку розробку, широкий набір бібліотек та простоту підтримки коду. PyQt5 використовується для створення зручного графічного інтерфейсу. [3, 4, 5]

Система побудована за модульним принципом і включає:

- модуль автентифікації та авторизації користувачів;
- модуль реєстрації та управління даними абітурієнтів;
- модуль ведення особових справ;
- модуль обліку пільг вступників;
- модуль формування та друку документів;
- модуль аналітики та звітності.

База даних vstup.db включає 14 таблиць, що забезпечують зберігання повної інформації про вступників денної та заочної форм навчання, їхні персональні дані, результати вступних випробувань, відомості про пільги та спеціальності.

Основні таблиці системи:

- Personalni_dani_vstupnikiv_denne/zaoch – персональні дані вступників;
- Entrance_examinations_denna/zaoch – результати вступних іспитів;
- Osobova_sprava_denna/zaoch – інформація з особових справ;
- Pilgi_vstupnikiv_denna/zaoch – облік пільг;
- Specialnosti_denn/zaoch – довідник спеціальностей.

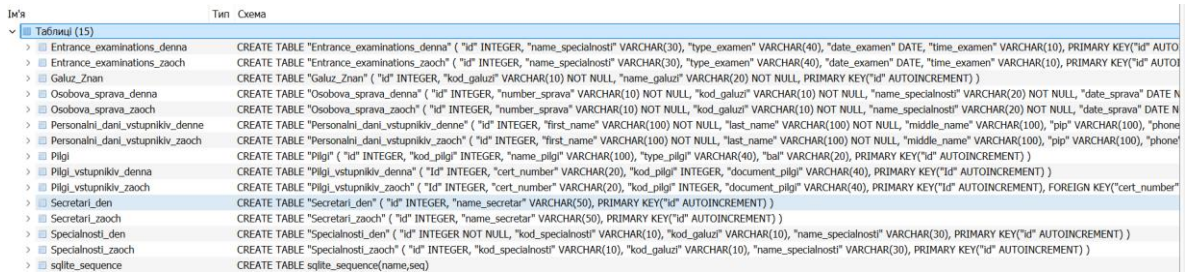


Рис. 1 – Схема таблиць бази даних

Система реалізовує повний цикл роботи з абітурієнтами: внесення персональних даних з автоматичною перевіркою на дублювання, формування особових справ із прив'язкою до спеціальностей, облік пільгових категорій, формування рейтингових списків, генерацію друкованих форм (анкети, титульні аркуші, довідки про пільги). Передбачено можливість імпорту/експорту даних через CSV-файли для інтеграції з державними порталами. [6]

Інтерфейс побудовано за принципом двопанельної структури: ліва навігаційна панель містить меню доступу до функцій, права робоча зона динамічно відображає відповідні форми. Особливу увагу приділено ергономіці: реалізовано інтелектуальний пошук за прізвищем, ім'ям або номером свідоцтва, контекстні підказки, автозаповнення полів, візуальну індикацію помилок. Система підтримує роботу як з денною, так і заочною формами навчання через дзеркальні інтерфейси. [7, 8]

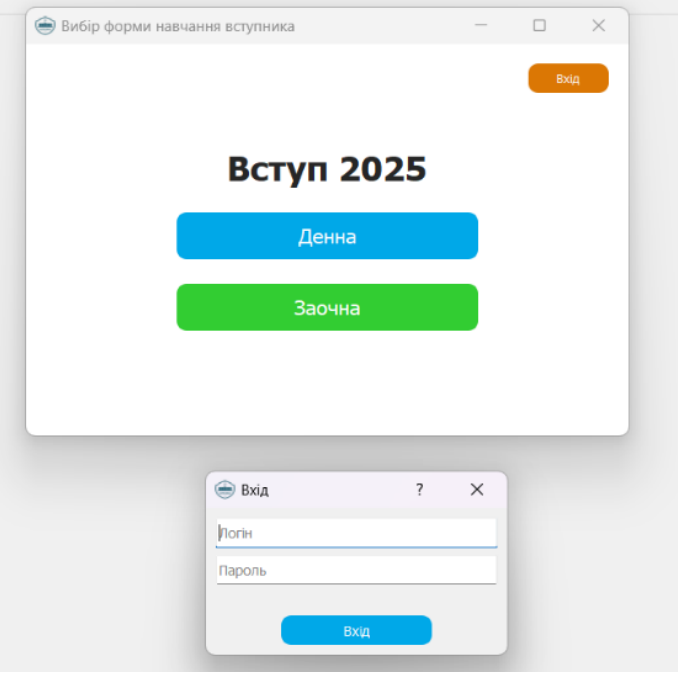


Рис. 2 – Інтерфейс модуля входу і вибору форми навчання

Ключові функції системи:

- Модуль реєстрації вступників забезпечує введення повних персональних даних, інформації про батьків, освітніх даних та оцінок. Реалізовано пошук за прізвищем або номером свідоцтва з можливістю редагування існуючих записів.
- Модуль особових справ автоматизує створення та ведення обліку справ з прив'язкою до обраної спеціальності, визначенням форми фінансування та відповідального секретаря.
- Модуль обліку пільг дозволяє швидко додавати, редагувати та видаляти інформацію про пільги з перевіркою наявності абітурієнта в базі даних.
- Модуль друку документів забезпечує автоматизоване формування анкет вступників, описів особових справ, титульних сторінок, документів про пільги та аркушів результатів випробувань.
- Модуль аналітики формує списки вступників за обраною спеціальністю з повною інформацією про кожного абітурієнта, включаючи контактні дані та наявність пільг.

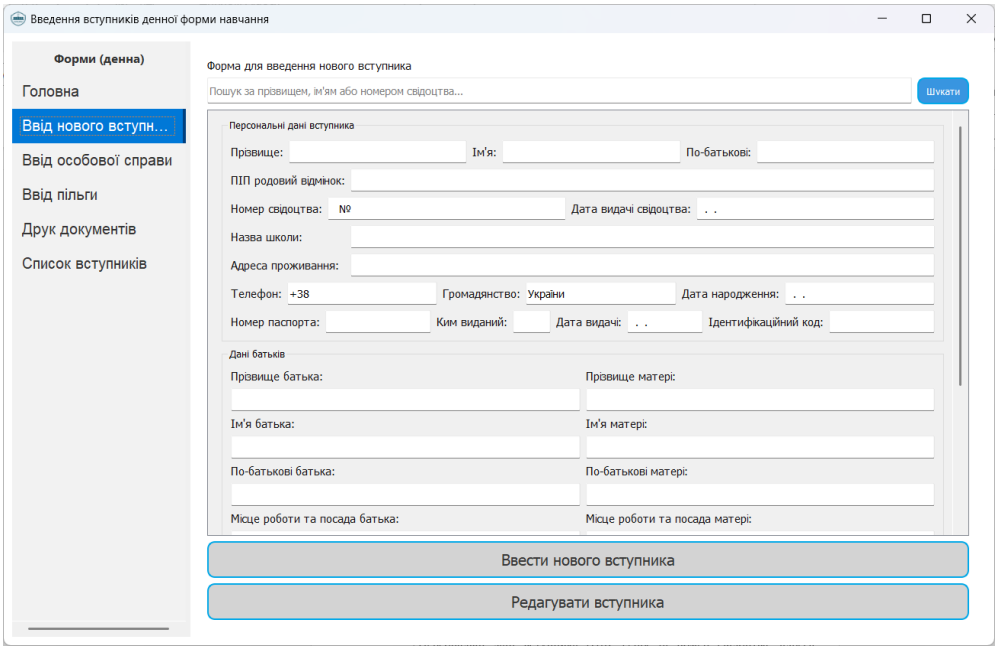


Рис. 3 – Інтерфейс сторінки “Ввід нового вступника”

Реалізовано комплексний підхід до захисту даних: авторизація з перевіркою облікових даних, хешування паролів за алгоритмом bcrypt, автоматичне резервне копіювання бази даних. Після аутентифікації відбувається авторизація з наданням доступу лише до розділів, що відповідають ролі користувача. Система відповідає вимогам законодавства щодо захисту персональних даних.

Проведене тестування включало перевірку функціональності окремих модулів, інтеграційне тестування та симуляцію пікових навантажень. Виявлені недоліки (некоректне позиціонування елементів інтерфейсу, конфлікти при багаторазових запитах) були усунені. Тестування підтвердило стабільність роботи системи при одночасній роботі кількох користувачів. [2]

Система була впроваджена у ВСП «КПЕФК ЛНТУ» та успішно використовувалась під час вступної кампанії літа 2025 року. Протягом вступної кампанії через систему було оброблено сотні заяв абітурієнтів денної та заочної форм навчання. Приймальна комісія відзначила значне спрощення роботи: час обробки однієї заяви скоротився, кількість помилок при внесенні даних зменшилась, а формування звітності тепер виконується за лічені хвилини. Секретарі комісії швидко освоїли інтерфейс системи завдяки його інтуїтивності. Жодного збою чи втрати даних за весь період вступу зафіксовано не було. Особливо цінною виявилась функція автоматичного резервного копіювання, яка забезпечила повну безпеку даних абітурієнтів.

Висновки. Розроблена інтегрована система управління процесом вступу демонструє ефективність автоматизації освітніх процесів у закладах фахової передвищої освіти. Система забезпечує: підвищення продуктивності приймальної комісії завдяки автоматизації рутинних операцій і зручному інтерфейсу, зниження кількості помилок через автоматичну валідацію даних та виключення подвійного введення інформації, прозорість процедур вступу завдяки централізованому збереженню даних та можливості швидкого формування звітності та доступність впровадження через використання безкоштовних інструментів (Python, SQLite) та можливість роботи на стандартному обладнанні. Модульна архітектура системи дозволяє легко адаптувати її до змін у нормативній базі та розширювати функціонал без змін у базовому коді. Дзеркальність реалізації модулів для денної та заочної форм навчання забезпечує єдину логіку роботи та спрощує навчання персоналу. Перспективи подальшого розвитку включають інтеграцію з ЄДЕБО, впровадження онлайн-кабінетів для абітурієнтів, розширення аналітичних можливостей та адаптацію системи для інших освітніх закладів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ВСП "Ковельський промислово-економічний фаховий коледж Луцького національного технічного університету". URL: https://kpefk.com.ua/ (дата звернення: 10.12.2024).

2. Stack Overflow – форум програмістів. URL: https://stackoverflow.com/ (дата звернення: 15.01.2025).

3. Python Documentation. URL: https://www.python.org/doc/ (дата звернення: 20.02.2025).

4. SQLite Documentation. URL: https://sqlite.org/docs.html (дата звернення: 20.02.2025).

5. PyQt5 Documentation. URL: https://www.riverbankcomputing.com/static/Docs/PyQt5/ (дата звернення: 28.02.2025).

6. Чернящук Н. Л., Бортник К. Я., Плевако Н. М. Аналіз дослідження функціонування інформаційної системи електронного документообігу. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2020. Вип. 41. С. 120-130.

7. Pilgrim M. Dive into Python. CreateSpace, 2012. 420 p.

8. Summerfield M. Programming in Python 3: A Complete Introduction to the Python Language. Boston: Addison-Wesley Professional, 2008. 648 p.

УДК 004.85:629.735
Закревський В.Л., Приходько О.С.
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк
email: o.prykhodko@lntu.edu.ua

РОЗРОБКА АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ БПЛА НА ОСНОВІ НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ

У роботі розглянуто проблему забезпечення стійкого автономного управління квадрокоптером у змінних та непередбачуваних умовах польоту, де традиційні ПІД-регулятори втрачають ефективність через залежність від точної моделі динаміки. Запропоновано підхід, що ґрунтується на навчанні з підкріпленням із використанням алгоритму Proximal Policy Optimization (PPO) та доменної рандомізації. У середовищі PyBullet під час навчання випадково змінювалися маса апарата, моменти інерції та зовнішні сили, що дозволило сформувати узагальнену політику, стійку до змін у внутрішніх і зовнішніх параметрах системи. Ефективність розробленого контролера оцінено у двох сценаріях: протидія постійному вітровому навантаженню та раптове збільшення маси БПЛА. У порівнянні з ретельно налаштованим каскадним ПІД-регулятором, RL-контролер продемонстрував вищу стабільність та адаптивність, зменшивши максимальне відхилення від цілі у вітрових умовах на ~40% та скоротивши час відновлення після зміни маси з 4.55с до 2.91с. Отримані результати підтверджують перспективність застосування навчання з підкріпленням для створення автономних систем управління БПЛА, здатних ефективно працювати в неідеальних умовах.

Ключові слова: навчання з підкріпленням; доменна рандомізація; адаптивне управління; автономні БПЛА.

Zakrevskyi V., Prykhodko O. Development of an Adaptive UAV Control Algorithm Based on Reinforcement Learning. This paper addresses the challenge of achieving robust autonomous control of a quadcopter operating in dynamic and unpredictable environments, where traditional PID controllers lose effectiveness due to their reliance on accurate system models. A reinforcement learning approach based on Proximal Policy Optimization (PPO) with domain randomization is proposed. During training in the PyBullet environment, the UAV's mass, inertia, and external forces were randomly varied, enabling the agent to learn a generalized and robust control policy. The performance of the developed controller was evaluated in two scenarios: resistance to constant wind disturbance and a sudden 20% increase in mass. Compared to a carefully tuned cascaded PID controller, the RL-based controller demonstrated superior stability and adaptability, reducing maximum position deviation under wind by approximately 40% and shortening recovery time after mass change from 4.55 s to 2.91 s. The results confirm the potential of reinforcement learning for developing adaptive and robust UAV control systems capable of reliable operation in real, non-ideal conditions.

Keywords: reinforcement learning; domain randomization; adaptive control; autonomous UAVs

Вступ. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стрімко інтегруються у цивільні, промислові та військові сфери, виконуючи все складніші задачі: від моніторингу та інспекції інфраструктури до автономної доставки та тактичних операцій. Зі зростанням рівня автономності збільшується й вимога до точності, надійності та стійкості польотних контролерів, яким необхідно забезпечувати керування в умовах, далеких від лабораторних. Проте забезпечення стабільного автономного функціонування БПЛА в динамічних і непередбачуваних середовищах залишається складною інженерною проблемою через нелінійність, багатовимірність і змінність аеродинамічних процесів.

Традиційні методи керування, такі як ПІД-регулятори, понад десятиліття залишаються галузевим стандартом завдяки простоті реалізації та зрозумілій теорії. Вони забезпечують високу ефективність у добре визначених умовах та за наявності точної математичної моделі апарата. Однак ці методи демонструють суттєве погіршення продуктивності за найменших відхилень робочих параметрів, зокрема зміни маси, моментів інерції, характеристик пропелерів або впливу зовнішніх факторів. На противагу цьому, навчання з підкріпленням (RL) пропонує концептуально інший підхід: агент самостійно формує оптимальну стратегію управління через взаємодію з середовищем та накопичення досвіду, не потребуючи явної моделі динаміки [1]. Це відкриває шлях до створення більш адаптивних і робастних систем керування.

Актуальність та постановка проблеми. У реальних умовах польоту автономні БПЛА стикаються з численними факторами, що змінюють їх динаміку: пориви вітру, турбулентність, зсув центра маси під час маневру, деградація пропелерів, неточності інерційної системи (IMU), температурні впливи, а також виробнича варіативність компонентів. Навіть ретельно налаштовані ПІД-регулятори втрачають ефективність, коли система виходить за межі тих режимів, під які вони були оптимізовані. Це створює фундаментальну проблему недостатньої стійкості та адаптивності традиційних контролерів у змінних і непередбачуваних середовищах.

Методи на основі навчання з підкріпленням здатні реагувати на широкий спектр неконтрольованих змін, але політики, навчені в ідеалізованих симуляторах, часто не працюють у реальному світі через відмінності між симуляцією та справжньою фізикою. Тому критично важливо підходити до процесу навчання так, щоб агент міг узагальнювати поведінку на широкому діапазоні моделей апарату і зовнішніх збурень. Одним із найефективніших методів є доменна рандомізація – цілеспрямоване випадкове варіювання параметрів симуляції, що змушує політику пристосовуватися до широкої множини сценаріїв ще на етапі навчання.

У цій роботі пропонується підхід, у якому доменна рандомізація застосовується для навчання RL-політики стабілізації квадрокоптера, що дозволяє зберігати стійкість і точність керування навіть за наявності змін динаміки, збурень або непередбачених факторів у реальному польоті.

Огляд існуючих методів. Сучасні дослідження демонструють широкий спектр способів інтеграції RL у системи керування БПЛА. У роботі [2] описано контролер, у якому нейромережевий агент напряму генерує моторні команди, а компенсація зовнішніх збурень – наприклад, поривів вітру – здійснюється завдяки спостерігачу станів. Такий підхід підвищує стійкість до непередбачуваних впливів, однак покладається на точність оцінювання цих збурень, що не завжди можливо у практичних умовах. Інший напрямок представлений у праці [3], де використано резидуальний контролер: до класичної схеми керування додається RL-компонент, яка компенсує невідомі або змінні частини динаміки. RL-політика навчається на множині параметричних змін моделі, що дозволяє отримати систему, здатну адаптуватися до апаратів з різними характеристиками. У статті [4] запропоновано підхід, орієнтований на максимальну узагальнюваність: використовується енкодер динаміки з глибокої нейромережі, а масштабно-чутлива рандомізація дозволяє одному агенту контролювати квадрокоптери різних розмірів, мас і конфігурацій. Це відкриває можливості для створення універсальних RL-контролерів, не прив'язаних до конкретної платформи.

Окреме місце займають гібридні архітектури, у яких RL не замінює, а доповнює традиційний контролер. У роботі [5] представлено змішувач контролерів, що комбінує стабільність класичного регулятора з адаптивністю RL-політики, натренованої з доменною рандомізацією. Така структура дозволяє досягти високої надійності, зберігаючи при цьому переваги гнучких підходів RL.

Методологія дослідження. Основою методології є формалізація задачі управління як Марковського процесу вирішення (MDP), що дозволяє застосовувати алгоритми навчання з підкріпленням. Враховуючи безперервність простору станів (положення, швидкість, орієнтація) та дій (тяги двигунів) БПЛА, було обрано алгоритм класу "Актор-Критик" – Proximal Policy Optimization (PPO).

Архітектура агента складається з двох нейронних мереж:

- Актор (Policy Network) $\pi_\theta(a|s)$: Мережа, параметризована вагами θ, яка для заданого стану s видає параметри стохастичної політики (середнє значення та стандартне відхилення Гауссового розподілу), з якої семплюється дія a.
- Критик (Value Network) $V_\phi(s)$: Мережа, параметризована вагами ϕ, яка оцінює очікувану сумарну винагороду (цінність) для стану s.

Ключова ідея PPO полягає в оптимізації сурогатної цільової функції, яка обмежує розмір оновлення політики на кожній ітерації, що забезпечує стабільність навчання. Спочатку розраховується відношення ймовірностей нової та старої політик:

$$r_t(\theta) = \frac{\pi_\theta(a_t|s_t)}{\pi_{\theta old}(a_t|s_t)} \quad (1)$$

де $\pi_{\theta old}$ – політика, за якою збиралися дані. Далі розраховується оцінка переваги (Advantage) $\hat{A}_t$, яка показує, наскільки кращою була дія a_t порівняно з середнім очікуванням у стані s_t. Цільова функція з обмеженням (clipping) має вигляд:

$$L^{\text{CLIP}}(\theta) = \hat{E}_t\left[\min\left(r_t(\theta)\hat{A}_t, clip(r_t(\theta), 1-\epsilon, 1+\epsilon)\hat{A}_t\right)\right] \quad (2)$$

де ϵ – гіперпараметр, що визначає розмір "довірчого регіону" (зазвичай $\epsilon = 0.2$). Ця функція не дозволяє відношенню $r_t(\theta)$ занадто сильно відхилятися від 1, що запобігає деструктивним, надто великим крокам оновлення політики.

Для досягнення адаптивності та робастності контролера застосовувалася стратегія доменної рандомізації. Під час навчання в симуляційному середовищі PyBullet на початку кожного епізоду випадковим чином варіювалися ключові параметри системи в заданих діапазонах:

- маса БПЛА: $m \in [m_{nom}-15\%, m_{nom}+15\%]$;
- моменти інерції: $I \in [I_{nom}-10\%, I_{nom}+10\%]$;
- зовнішні сили: додавалась випадкова силова дія, що імітує вітер.

Такий підхід змушує агента вивчати не вузькоспеціалізовану політику, а узагальнену стратегію, інваріантну до змін у динаміці та зовнішньому середовищі.

Результати та їх обговорення. Для оцінки ефективності розробленого RL-контролера було проведено його порівняння з ретельно налаштованим каскадним ПІД-регулятором. Аналіз проводився у двох ключових адаптивних сценаріях, які відображають типові проблеми для реальних польотів.

1. Сценарій протидії вітру. На апарат, що зависав у точці, подавалося постійне вітрове навантаження. RL-контролер продемонстрував дещо кращу стійкість: максимальне відхилення від цілі було на ~40% меншим, а статична помилка утримання позиції скоротилася з 0.28 м до 0.15 м порівняно з ПІД-регулятором.

2. Сценарій зміни маси. Під час польоту маса БПЛА раптово збільшувалася на 20%. RL-контролер показав високу адаптивність, відновивши стабільний політ за 2.91 с з максимальним просіданням по висоті 0.68 м. Для порівняння, ПІД-регулятор потребував 4.55 с для стабілізації, а просідання склало 1.15 м, що свідчить про дещо нижчу стійкість до змін внутрішніх параметрів.

Висновки. Результати дослідження підтверджують високу ефективність застосування навчання з підкріпленням для розробки адаптивних систем управління БПЛА. Розроблений на основі алгоритму PPO та доменної рандомізації контролер перевершив традиційний ПІД-регулятор у здатності протистояти зовнішнім збуренням та адаптуватися до змін у динаміці апарату. Це відкриває перспективи для створення більш надійних та автономних безпілотних систем, здатних ефективно функціонувати в реальних, неідеальних умовах.

Перспективою подальшої роботи є реалізація наступних завдань: розробка модуля автоматичного керування, який інтегруватиметься поверх традиційного польотного контролера; розширення доменної рандомізації для охоплення більшої кількості реальних сценаріїв; практична перевірка ефективності RL-контролера на фізичних БПЛА, включно з тестами на відкритому повітрі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sutton R. S., Barto A. G. *Reinforcement Learning: An Introduction.* 2nd ed. URL: http://incompleteideas.net/book/the-book-2nd.html (date of access: 10.11.2025)

2. Pi C.-H., Ye W.-Y., Cheng S. Robust Quadrotor Control through Reinforcement Learning with Disturbance Compensation. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 7. P. 3257. URL: https://doi.org/10.3390/app11073257 (date of access: 14.11.2025).

3. Zhang R., Zhang D., Mueller M. W. *ProxFly: Robust Control for Close Proximity Quadcopter Flight via Residual Reinforcement Learning.* arXiv preprint arXiv:2409.13193, 2024. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.13193

4. Vaidya V., Keshavan J. Dynamics-Invariant Quadrotor Control using Scale-Aware Deep Reinforcement Learning. arXiv preprint arXiv:2503.09622, 2025. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.09622

5. Nahrendra I.M.A., Tirtawardhana C., Yu B., Lee E.M., Myung H. *Retro-RL: Reinforcing Nominal Controller With Deep Reinforcement Learning for Tilting-Rotor Drones.* arXiv preprint arXiv:2207.03124, 2022. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.03124

УДК 621.365.036(03)
Нежурін В.І., Куваєв В.Ю., Самойленко Ю.О.
Український державний університет науки та технологій, м. Дніпро
E-mail: v_i_n@i.ua , victorkuvaev@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ ЕНЕРГІЇ В РОБОЧОМУ ПРОСТОРІ ВАННИ ЕЛЕКТРОПЕЧІ РПЗ-48(63) ПРИ ВИПЛАВЦІ МАРГАНЦЕВИХ ФЕРОСПЛАВІВ ШЛАКОВИМ ПРОЦЕСОМ

В роботі представлене дослідження розподілення енергії у ванні шестиелектродної феросплавної печі з метою визначення адекватних параметрів для керування процесом виплавки марганцевих феросплавів. Дослідження виконувалися шляхом моделювання з використанням схеми заміщення з зосередженими параметрами, у якій електрична дуга представлена нелінійним елементом. У якості вихідних параметрів при моделюванні використовуються значення активних та реактивних опорів, напруг та струмів, отримані з літературних джерел та матеріалів дослідження діючої феросплавної печі РПЗ-63. Дослідження показали, що зміна кількості сплаву у ванні протягом циклу процесу плавки викликає зміну «кута зсуву» між амплітудою корисної фазної напруги та амплітудою струму дуги. Вказаний результат дає можливість використання цього кута у якості параметру для керування технологічним процесом.

Ключові слова: феросплавна електропіч, пічна ванна, трансформатор, феросплави, схема заміщення, розподілення потужності, активний та реактивний опір ванни, шлак, сплав, електрод, кут зсуву фаз.

V. Nezhurin, V. Kuvaiev, Yu. Samoilenko. Study of energy distribution in the working space of the bath of the RPZ-48(63) electric furnace during the smelting of manganese ferroalloys by slag process. The paper presents a study of energy distribution in the bath of a six-electrode ferroalloy furnace in order to determine adequate parameters for controlling the smelting process of manganese ferroalloys. The studies were performed by modeling using a lumped-parameter equivalent circuit, in which the electric arc is represented by a nonlinear element. The values of active and reactive resistances, voltages, and currents obtained from literary sources and research materials of the operating ferroalloy furnace RPZ-63 are used as initial parameters in the modeling. Studies have shown that changing the amount of alloy in the bath during the melting process cycle causes a change in the “shift angle” between the amplitude of the useful phase voltage and the amplitude of the arc current. This result makes it possible to use this angle as a parameter for controlling the technological process.

Keywords: ferroalloy electric furnace, furnace bath, transformer, ferroalloys, equivalent circuit, power distribution, active and reactive resistance of the bath, slag, alloy, electrode, phase shift angle.

Постановка проблеми. Прямокутна електропіч типу РПЗ-48(63) призначена для виплавки марганцевих феросплавів безперервним процесом і обладнана трьома однофазними пічними трансформаторами типу ЕОЦНК - 40000/150 потужністю по 21000 кВА кожен. Шість електродів з розмірами поперечного перетину 2800х650 мм теж розташовані в одну лінію. Піч забезпечена трьома льотками з одного боку проти кожної пари електродів і апаратами пропалення з живленням від спеціального трансформатора та обладнана установкою поздовжньо-ємнісної компенсації, призначеною для підвищення коефіцієнту потужності шляхом часткової компенсації реактивної потужності пічного контуру. Для контролю температурного режиму футерування в 18 точках кожуха встановлені термопари, виведені на самописні прилади пульта керування. Навколо пічних електродів встановлені водоохолоджувані прямокутні шихтові воронки.

Коротка мережа печі складається з трубчастого збіфільованого пакету (по 32 труби на фазу), гнучкого пакету струмопровідних труб, сполучених з вісьмома контактними плитами електродотримача, що притискаються до електроду пружинами натискного кільця. Кожен гідропідйомник для вертикального пересування електроду складається з двох плунжерів, траверси і сполучного валу, що забезпечує синхронність руху плунжерів.

Шлакові процеси, в цілому, відповідають технологіям селективного відновлення, у яких відновлюється лише група цільових елементів, що є у руді, а супутні оксиди інших елементів утворюють шлаки. До цих процесів відноситься виробництво феросилікомарганцю (кратність шлаку 0,45-0,6), феромарганцю (0,8-1,2), вуглецевого ферохрому (0,8-0,9), а також процес виплавки

феросилікохрому в одну стадію (0,65-0,7). Електричний опір шихти в шлакових процесах значно вищий, ніж у безшлакових.

Розвиток уявлень про будову робочого простору печей карботермічного відновлення дозволяє глибше зрозуміти кінетику та механізм процесів, особливості енергетичного забезпечення окремих зон перетворення шихти. Ці відомості також необхідні для конструювання печей, створення математичних моделей процесу, окремих режимів технології та розробки алгоритмів керування та оптимізації процесу. Будучи елементом електричної схеми заміщення робочого простору печі, зона розплаву істотно впливає на енергетичні характеристики процесу, зокрема, на розподіл потужності по зонах ванни, конфігурацію температурного і електричного полів, техніко-економічні показники процесу. Маючи найвищий робочий опір і будучи найбільш значним споживачем теплової та електричної енергії, він, в основному, і визначає характер температурного та електричного режимів плавки.

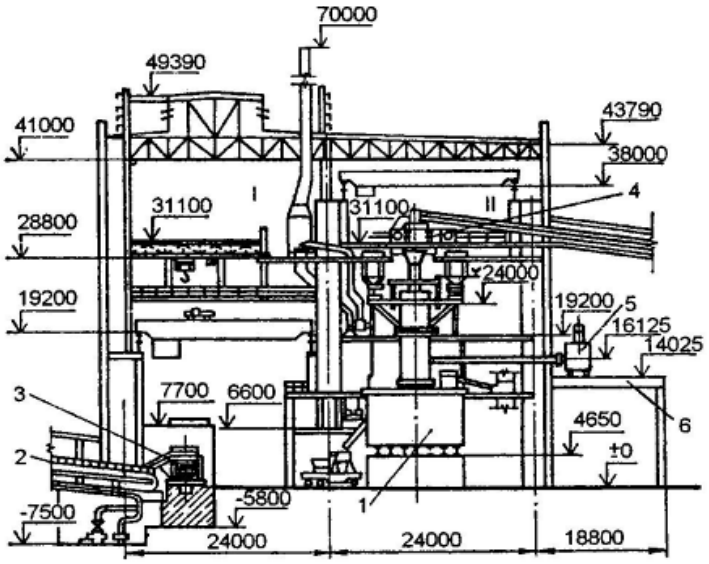


Рис.1. Розріз цеху виробництва марганцевих феросплавів НЗФ з печами РПЗ-63:
1 – електропіч, 2 – розливочна машина, 3 – ківш, 4 – шихтоподача, 5 – трансформатор, 6 – естакада

Найбільш повно вивчені склад та властивості шлаків марганцевого виробництва. З результатів дослідження властивостей малофосфористого марганцевого шлаку випливає, що навіть при перегріві над температурою "ліквідус" на 50-70° шлак має дуже високий питомий електричний опір – 30-50 Ом•см. Методи фізичного та математичного моделювання розглядають робочий простір печі як об'єкт з розподіленими параметрами. Однак електричний контур відновлювальних печей можна представити і у вигляді електричної схеми із зосередженими параметрами – еквівалентної схеми заміщення. Дане спрощення моделі має особливе значення для вирішення завдань оперативного контролю та керування електричним режимом процесу.

Еквівалентні схеми заміщення процесів визначаються виходячи з картини розтікання струму, отриманої за результатами моделювання. У шлакових процесах дуга шунтована опором шихти і послідовно з ними включено опір розплаву [1, 2]. Складнощі оцінки характеру розподілення енергії по зонах робочого простору обумовлені, перш за все, браком інформації про електричні параметри схеми заміщення. Безпосередньо вимірюваними електричними характеристиками є струми в електродах і спад напруги в окремих фазах кола, чого явно недостатньо для розрахунку опорів окремих зон і потужностей, що виділяються в них. У зв'язку з цим певний інтерес становлять дослідження розподілення потенціалу та густини струму у ваннах діючих феросплавних печей, проведені методом зондування, тобто по суті, робочого простору ванни різних технологічних процесів.

Методика та результати дослідження. У якості вихідних параметрів при моделюванні використовуються значення активних та реактивних опорів, отримані з літературних джерел [3] та діючої феросплавної печі РПЗ-63. Кінцевою метою моделювання є дослідження розподілення енергії по зонах робочого простору ванни печі. При використанні наведеної нижче схеми заміщення та вихідних даних можливі дві послідовності (алгоритми) розрахунку. В обох випадках миттєві значення напруг, струмів та потужностей задаються/обчислюються як масиви точок і розрахунки

проводяться послідовно для кожної точки часу протягом півперіоду. Зміни електричного та/або електродного режиму, а також зміни стану вмісту ванни печі в залежності від стадії процесу (циклу) виплавки можуть бути відображені у моделі шляхом зміни вихідних даних.

На рис. 2 представлено переріз ванни печі РПЗ-63 з шістьма електродами, а на рис. 3 – схема заміщення для одного з електродів печі, де вихідні дані відповідають діючій печі. Визначення форми кривої струму дуги (фактично у відносних одиницях) виконане графічним способом за половину періоду змінного струму – 0,01 с. У якості вихідних даних використані синусоїда напруги дуги та вольт-амперна характеристика «чистої» дуги без врахування елементів, включених послідовно та паралельно з дуговим проміжком. Амплітудне значення напруги дуги суміщено з максимальною напругою на вольт-амперній характеристиці. Відповідно до прийнятої методики розрахунку, початкова фаза струму прийнята нульовою, а зсув фази у бік випередження відображається у кривих напруги.

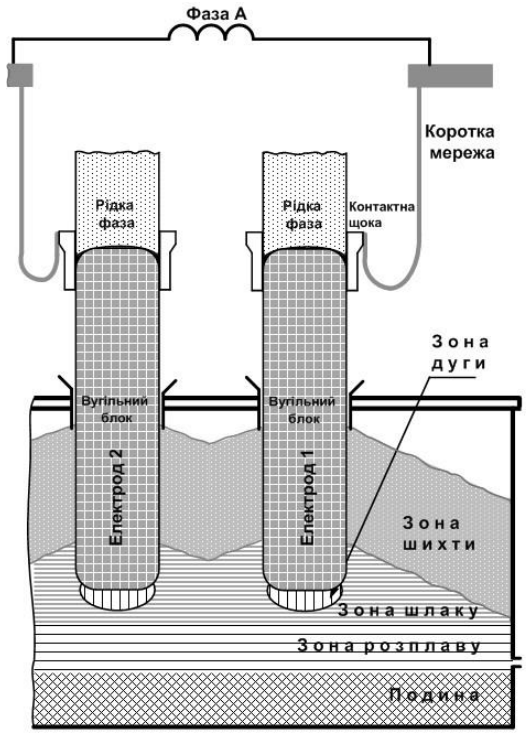


Рис.2. Переріз ванни печі РПЗ-63 (одна фаза)

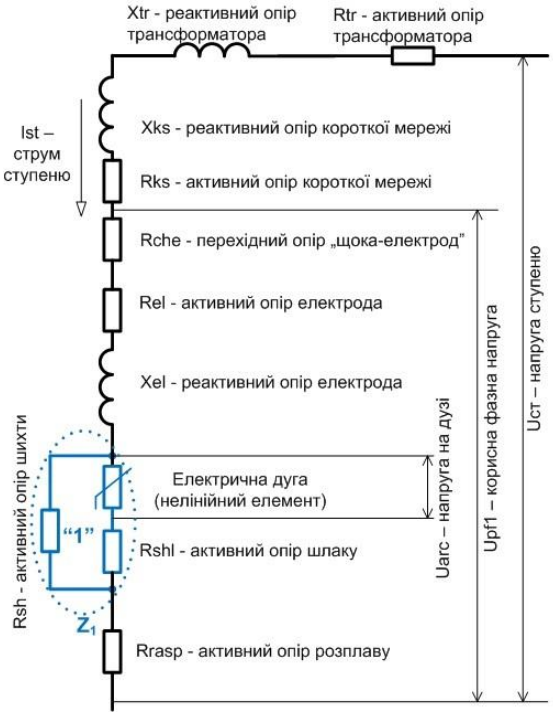


Рис.3. Схема заміщення (один електрод)

Розрахунками схеми заміщення електропечі шлакового процесу (виплавка феросилікомарганцю) встановлено, що зміна кількості сплаву від початку (кінця попереднього випуску) до кінця циклу процесу виплавки (початку наступного випуску) викликає суттєву зміну «кута зсуву» між амплітудою корисної фазної напруги на електроді та амплітудою миттєвого значення струму дуги. Кути зсуву фаз між струмом електрода та напругою ступені і між струмом електрода та корисною фазною напругою зменшуються протягом циклу, що пояснюється впливом опору розплаву та шлаку на перерозподілення енергії у ванні печі. Можна теж очікувати, що регулювання електричного режиму печі для виплавки феросилікомарганцю повинно відбуватися шляхом підтримання «кута зсуву» між корисною фазною напругою та амплітудним значенням струму дуги як на початку, так і у кінці періоду плавки сплаву печі. Як результат роботи, на рис.4 представлена спрощена структурна схема контролю та керування електротехнологічнологічним режимом виплавки феросилікомарганцю в системі автоматичного керування шестиелектродною феросплавною електропіччю.

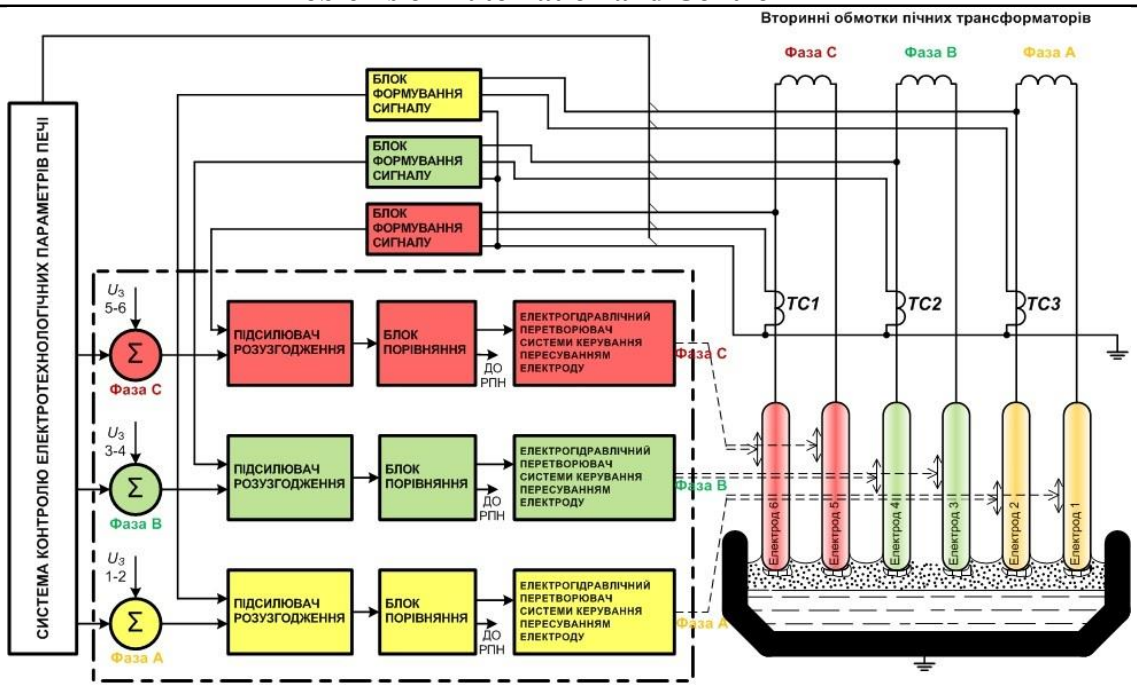


Рис. 4. Спрощена структурна схема системи керування піччю РПЗ-63

Висновки. Таким чином**,** можна зробити ряд висновків, спираючись на результати дослідження печей .

1. У робочому просторі феросилікомарганцевої (шлакової) печі присутні чотири основні зони, що є елементами електричного навантаження кожної з фаз – шихта, дуга, розплав, шлак.

2. Найбільш ефективним перетворювачем електричної енергії в теплову є дуговий розряд, що має яскраво виражену нелінійність електричних властивостей. Статична ВАХ дуги має падаючу форму, ідеалізована динамічна – релейну. На осцилограмах струму потужної шунтованої дуги є паузи, а спад напруги на дузі протягом її горіння постійний.

3. Раціональний розподіл енергії по зонах є основним критерієм забезпечення високих техніко-економічних показників процесу. Запропоновано уточнену заступну схему фази електропечі для виплавки марганцевих феросплавів з урахуванням структури реакційних зон на основі аналізу досліджень діючої електропечі.

4. Недостатність інформації про поточний стан процесу, зумовлена недоступністю об'єкта для прямих вимірювань, визначає низький рівень оперативного керування процесом.

5. Для ефективного керування процесом слід суттєво розширити коло параметрів стану за рахунок розробки та створення нових надійних методів непрямого визначення параметрів та характеристик окремих зон. В роботі представлена спрощена структурна схема контролю та керування електротехнологічнологічним режимом виплавки феросилікомарганцю в системі автоматичного керування феросплавною електропіччю, яка використовує у якості вхідних параметрів кути зсуву фаз між струмом та напругою електроду.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Використання схем заміщення з зосередженими параметрами для дослідження розподілення енергії у робочому просторі ванн дугових електропечей з метою керування технологічним процесом. Нежурін В. І., Куваєв В. Ю., Демчук І. В., Заскалько Є. О., Васецький В. В., Помазан Б. Ю. , Збірник н-т статей «SCIENTIFIC GOALS AND PURPOSES IN XXI CENTURY, SEATTLE», USA, October 19-20, 2024, SEATTLE 2024, ISSN 2709-4685, с.369-387. DOI: https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.10.2024.038

2. Нежурін В.І., Куваєв В.Ю. Дослідження розподілення енергії у робочому просторі ванн феросплавних електропечей з використанням схеми заміщення.. Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE 2024). Odesa, Ukraine , 2024: proceedings. Odesa Military Academy, 2024, с.45-47. Режим доступу:

https://figshare.com/articles/conference_contribution/_i_Electrical_and_Power_Engineering_and_Electromechanics_i_i_EPEE_2024_i_Odesa_Ukraine_May_15_2024_proceedings_Odesa_Military_Academy_2024_57_p_/25858477

3. Nezhurin V.I., Nikolenko A.V., Kuvaiev V.Yu., Ivashenko V.P. THE STRUCTURE OF THE WORKING SPACE OF A RECTANGULAR MINE ELECTRIC FURNACE FOR SMELTING FERROSILICON MANGANESE, WITH CONSIDERING THE EXPERIMENTALLY STUDIED GAS-DYNAMIC FEATURES OF THE CONTENTS OF THE BATH. - Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. Том 31 (70). № 6, 2020. Ч. 2. DOI https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.6-2/08

4. Лозинський О.Ю., Паранчук Я.С., Паранчук Р.Я., Матіко Ф.Д. Розвиток методів та засобів комп'ютерного моделювання для дослідження електричних режимів дугової сталеплавильної печі. // Науковий вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», серія «Електротехніка і Електромеханіка»-2020.-№3.-с.28-37.

5. Modelling of AC Arcs in Three-Phase Submerged Arc Furnaces. Gudrun Saevarsdottir, Hilde Loken Larsen and Jon Arne Bakken. Norwegian University of Science and Technology, Norway. The Proceedings of INFACON 8. p.317-322. Режим доступу: https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconVIII/317-Saevarsdottir.pdf

6. Brusa, E.G.M. Design and Structural Optimization of the Electric Arc Furnace Through a Mechatronic-Integrated Modeling Activity / E.G.M. Brusa, .Morsut // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2018. – Vol. 20. – p. 1099–1107. Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/document/6952960

УДК 519.6

Решетило О. М., Лисенко В. Ю.
Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ГРАНУЛЬОВАНОГО КОМБІКОРМУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Робота присвячена аналізу технологічного процесу виробництва гранульованого комбікорму як об'єкта керування. Розглянута технологічна схема виробництва комбікорму та процес його гранулювання. Розроблено карта технологічного процесу. Розроблено вимоги до системи автоматизації, що розробляється. Проведено аналіз технологічного процесу виробництва гранульованого комбікорму як об'єкта керування, на основі якого розроблено чорний ящик.

Ключові слова: автоматизована система, керування, технологічний процес, виробництво, грунульований комбікорм, об'єкт керування.

Reshetylo O., Lysenko V. Analysis of the technological process of granular feed production as a management object. The work is devoted to the analysis of the technological process of producing granulated feed as a control object. The technological scheme of producing feed and the process of its granulation are considered. A technological process map is developed. Requirements for the automation system being developed are developed. An analysis of the technological process of producing granulated feed as a control object is carried out, on the basis of which a black box is developed.

Keywords: automated system, control, technological process, production, pelleted feed, control object.

Постановка проблеми.

Сучасні тенденції розвитку агропромислового комплексу передбачають широке впровадження автоматизованих та інтелектуальних систем у всі етапи виробництва. Особливо це стосується галузі виробництва кормів, де стабільність якості продукції та ефективність використання ресурсів мають вирішальне значення для конкурентоспроможності підприємства.

Виробництво гранульованого комбікорму – складний багатостадійний процес, який включає приймання, очищення, подрібнення, змішування, дозування, гранулювання, охолодження та фасування готової продукції. Для забезпечення високої якості комбікорму необхідно точно дотримуватись технологічних режимів, підтримувати оптимальні параметри температури, вологості та продуктивності обладнання.

Ручне керування таким процесом пов'язане з великими витратами праці, високою ймовірністю помилок оператора та неможливістю забезпечення стабільності показників. У зв'язку з цим розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва гранульованого комбікорму є надзвичайно актуальною.

Впровадження автоматизації дозволяє:

- підвищити якість і однорідність продукції;
- оптимізувати витрати енергоресурсів і сировини;
- знизити вплив людського фактору;
- забезпечити безперервний контроль параметрів технологічного процесу;
- підвищити продуктивність та надійність роботи обладнання.

Таким чином, створення автоматизованої системи керування є важливим кроком до цифровізації та модернізації кормового виробництва, що відповідає сучасним вимогам енергоефективності, екологічності та стабільної якості продукції.

Мета роботи – розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва гранульованого комбікорму, яка забезпечує підвищення ефективності, стабільності та якості виробництва за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання та зменшення впливу людського фактору.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виробництва гранульованого комбікорму.

Предмет дослідження – автоматизована система керування технологічним процесом виробництва гранульованого комбікорму.

Методи досліджень – опис, аналогія, порівняння, аналіз, синтез, системний підхід.

Задачі дослідження:

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) провести аналіз технологічного процесу виробництва гранульованого комбікорму та визначити основні параметри, що впливають на якість продукції;

2) розробити структурну схему автоматизованої системи керування та описати її основні функціональні підсистеми;

3) обґрунтувати вибір технічних засобів автоматизації (датчиків, контролерів, виконавчих механізмів, засобів візуалізації);

4) розробити алгоритм роботи системи керування технологічним процесом;

5) створити електричну принципову схему ввімкнення основного технологічного обладнання;

6) провести аналіз ефективності впровадження розробленої системи.

Джерела інформаційної бази досліджень – відомості про технологічний процес виробництва гранульованого комбікорму.

Реалізація розробленої автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва гранульованого комбікорму, дозволить не лише підвищити якість гранульованого комбікорму та продуктивність лінії, а й зменшити енергетичні витрати та кількість води, що використовується у виробничому процесі. Розробка може бути використана для автоматизації технологічного процесу виробництва гранульованого комбікорму, як для тварин так і риби.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

«Комбікорм – це складна однорідна суміш очищених та подрібнених до необхідної величини різних кормових засобів і мікродобавок, що виробляється за науково-обґрунтованими рецептами і забезпечує повноцінну годівлю тварин чи птиці.

За призначенням і складом комбікорми поділяють на повнораціонні, концентрати, балансуючі добавки та премікси.

Повнораціонний комбікорм повністю забезпечує потреби тварин і птиці в поживних, мінеральних та біологічно активних речовинах.

Концентрат – це комбікорм з підвищеним вмістом протеїну, мінеральних речовин і добавок. Для забезпечення біологічно повноцінної годівлі тварин він згодовується разом із зерновими, соковитими або грубими кормами.

Балансуючі добавки бувають білкові, білково-вітамінні, білково-вітамінно-мінеральні. Це однорідна суміш подрібнених до необхідної крупності високобілкових кормових засобів і мікродобавок (мінеральні речовини, вітаміни, лікувальні засоби та ін.), які використовуються для виготовлення комбікормів в умовах підприємств. Рецепти добавок розробляють і використовують за вмістом поживних речовин в основних кормах.

Премікс – однорідна суміш подрібнених до необхідної крупності мікродобавок і наповнювача, яку використовують для збагачення комбікормів і виробництва білково-вітамінних добавок.

Комбікорми виробляють у розсипному, гранульованому (у вигляді щільних грудочок певної форми і розмірів) і брикетованому вигляді (плитки геометрично правильної форми і розмірів). Для птиці виробляється комбікормова крупка шляхом подрібнення гранульованого комбікорму.

Основними складовими комбікормів є: фуражне зерно злакових і бобових культур; кормові відходи елеваторів, борошномельно-круп'яних і харчових підприємств; грубі корми; трав'яне борошно; кормові дріжджі; продукти (відходи) олійно-екстракційного, крохмале-патокового, бродильного, цукрового і гідролізного виробництв; корми тваринного походження; мінеральна сировина; продукти хімічної і мікробіологічної промисловості. Всього сировинна база комбікормової промисловості налічує понад дві тисячі кормових засобів, з яких більше 80 % виробляється безпосередньо у сільському господарстві.» [1]

«Рецептура комбікормів розробляється галузевими науково-дослідними установами на основі узагальнення багаторічного науково-господарського досвіду годівлі сільськогосподарських тварин, а також з урахуванням природно-кліматичних особливостей різних регіонів країни. Рецепти є письмовою вказівкою на виготовлення комбікормів. Їм присвоюють номери за видами тварин і птиці. Наприклад, для великої рогатої худоби встановлені такі номери: 60 – дійні корови, 61 – тільні і сухостійні корови, 62 – телята віком від 1 до 6 міс, 63 – молодняк віком від 12 до 18 міс, 65 – велика рогата худоба на відгодівлі і 66 – бугаї-плідники.

Нумерують рецепти двома числами, з яких перше означає вид і групу тварин, а друге – порядковий номер рецепта для даної виробничої групи тварин і птиці. Обидва числа ставлять поряд через тире. Між знаком № і числом (або після числа) ставлять літерні знаки: ПК – повнораціонний комбікорм; К – комбікорм-концентрат; БВД (БВМД) – білково-вітамінні (мінеральні) добавки; ЗМЦ – замінник цільного (незбираного) молока; П – премікси. Наприклад: № ПК 1-123 – повнораціонний комбікорм для курок-несучок з порядковим реєстраційним номером 123.

Рецепти комбікормів і кормових сумішей, що відповідають вимогам місцевих споживачів і постачальників сировини, в кожній зоні можуть бути свої.

Вимоги до якості комбікормів для різних видів і груп тварин та птиці регламентують відповідними стандартами.» [1]

Технологічний процес виробництва комбікормів на господарських та міжгосподарських комбікормових підприємствах здійснюється за Правилами організації і ведення технологічного процесу на комбікормових заводах.

Крім інших технологічних операцій, правила передбачають [2]:

– очищення сировини від органічних, мінеральних та металомагнітних домішок;

– відокремлення плівок від зернівок вівса та ячменю;

– подрібнення компонентів;

– дозування і змішування компонентів;

– гранулювання або брикетування комбікормів;

– зберігання і відпуск готової продукції.

На рисунку 1 приведено технологічну схему виробництва розсипних комбікормів.

«Гранулювання комбікормів збільшує їх об'ємну масу, знижує самосортування й розпилення продукту. В гранулах краще зберігаються вітаміни, мікроелементи, антибіотики, що сприяє кращому їх засвоєнню організмом тварин і птиці, а в результаті – підвищенню їх продуктивності. Гранульовані комбікорми виробляють для всіх видів тварин, птиці і риб. Виробляють гранули циліндричної форми діаметром 4,7; 7,7; 9,7; 12,7 та 19 мм. Для гранулювання застосовують установки типу ДГ, Б6-ДГВ та ін. До складу установок входять гранулятор, охолоджувальна колонка, подрібнювач, сепаратор.

Комбікорми гранулюють сухим і вологим способами. Найпоширеніше сухе гранулювання, за якого розсипний комбікорм обробляють сухою парою при температурі 130-140 °С, що подається у змішувач під тиском 0,35-0,40 МПа. Нагрітий до 50-70 °С і зволожений до 15-18 % комбікорм надходить у камеру пресування, де пресувальними роликами продавлюється крізь робочі канали матриці, на виході з яких гранули відрізаються нерухомим ножем. Після преса гранули мають температуру 70-80 °С. Потоком повітря вони спрямовуються в охолоджувальну колонку, на виході з якої їх температура має бути не більш як на 10 °С вищою за температуру навколишнього середовища.

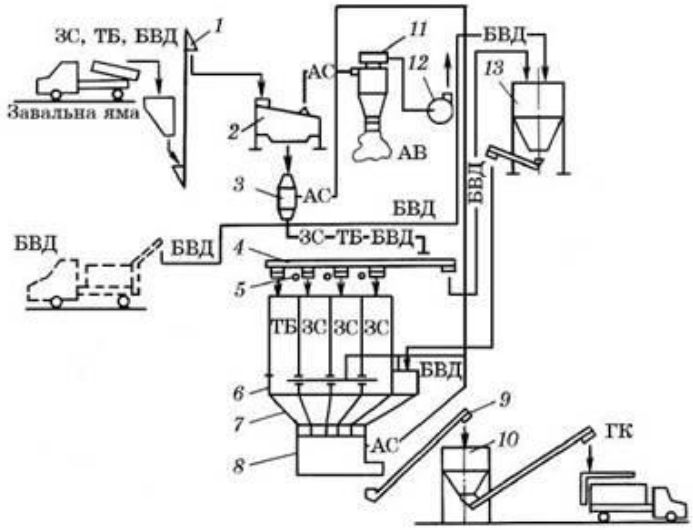


Рисунок 1 – Технологічна схема виробництва комбікормів агрегатом УМК-Ф-2:
1 – норія; 2 – сепаратор; 3 – магнітна колонка; 4 – розподільний шнек; 5 – рейкова засувка; 6 – оперативні бункери; 7 – наддозаторні бункери; 8 – дробарка; 9 – похилий шнек; 10 – бункер готового корму; 11 – циклон; 12 – вентилятор; 13 – бункер для зберігання БВД; ЗС – зернова сировина;
ТБ – трав'яне борошно; БВД – білково-вітамінні добавки; ГК – готовий комбікорм; АС – аспіраційна система; АВ – аспіраційні відходи

При вологому гранулюванні комбікорм зволожується до 30-35 % водою при температурі 70-80 °С, після чого гранули обов'язково підсушуються, внаслідок чого дорожчає їх виробництво. Охолоджені (підсушені) гранули пропускають через сепаратори для відокремлення дрібних борошнистих часточок і подають на склад готової продукції.

Замість пари і води при гранулюванні комбікормів можуть використовуватися рідкі в'яжучі речовини, такі як – меляса, гідрол та інші.

Найвигіднішим є виробництво крупних гранул діаметром 9,7-19 мм. При виготовленні гранул менших розмірів значно знижується продуктивність пресів і збільшуються витрати електроенергії. Тому комбікорми для молодняку птиці, курок-несучок і риби виробляють у вигляді крупки певного гранулометричного складу. Для цього гранули надходять на подрібнювачі різних типів з наступним сортуванням на просівній машині з двома ситами. Схід з верхнього сита – крупні частинки, які повертаються на подрібнення, з нижнього – готова крупка, а прохід – борошнистий продукт спрямовується на повторне гранулювання.

Зберігають сировину за видами і якістю з урахуванням мінімального її переміщення у процесі зберігання і можливості подачі для виробництва будь-якого виду сировини. Не допускається змішування різних видів сировини, потрапляння в неї вологи, скла та інших домішок. Зернову і гранульовану сировину розміщують переважно у місткостях силосного типу; сировину, що має низьку сипкість, – на складах підлогового типу або в силосах, обладнаних пристроями для випуску; сировину тваринного походження, сухі кормові дріжджі, трав'яне і хвойне борошно та ін. – у тарі до подачі у виробництво; сировину мінерального походження (крейду, сіль та ін.) – на критих складах ізольовано від інших видів сировини; рідку сировину – в цистернах, бочках, спеціально обладнаних для приймання і відпуску, до подачі у виробництво.

Комбікорми розсипні і гранульовані, а також білково-вітамінні добавки зберігають переважно на складах силосного типу, а якщо таких немає, то на складах підлогового типу насипом або в тарі. У сховищах окремо зберігають кожний вид комбікорму за рецептами і видачею їх споживачам, не допускаючи їх змішування і самосортування.» [2]

Гранулювання кормів – це процес агломерації, тобто об'єднання дрібних частинок у більші частинки, під дією механічних процесів зволоження, нагріву та тиску [3].

Гранулювання комбікорму забезпечує [3]:

1) покращення поживної ефективності корму для тварин;
2) формується однорідний збалансований корм;
3) зменшуються витрати корму на одну тварину;

4) покращуються механічні характеристики корму;
5) збільшується питома вага;
6) покращуються характеристики текучості.

Покращується гігієнічність та стерильність корму.

Лінія гранулювання комбікорму приведена на рисунку 2 працює наступним чином.

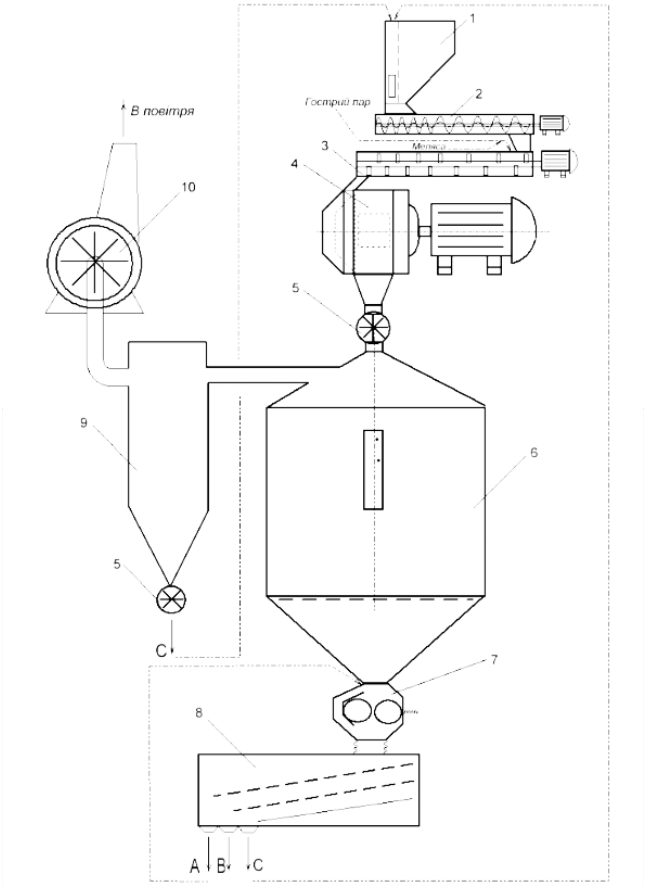


Рисунок 2 – Принципова схема лінії гранулювання:
1 – бункер; 2 – шнековий дозатор; 3 – кондиціонер; 4 – гранулятор; 5 – шлюзовий затвор; 6 – охолоджувач; 7 – вальці; 8 – просіювач; 9 – циклон; 10 – вентилятор

«Розсипний корм із бункера відбирається дозуючим шнеком для подачі в кондиціонер. Для задання необхідної величини подачі можуть змінюватися частота обертання шнека або крок його навивки.

У кондиціонері продукт насичується гострою парою з можливістю додавання меляси. Що дозволяє розігріти його до 70-80 °С, зволожити та розм'якшити. При проходженні через отвори гранулятора температура маси зростає ще на 5-15 °С [4].

Необхідно забезпечити час знаходження продукту в кондиціонері до 40 с., але в більшості випадків – до 20 с. і менше. Тому доводиться частину лопаток повертати в зворотній бік.

Шлюзовий затвор відсікає порожнину гранулятора від охолоджувача. В охолоджувачі через шар гранул проходить повітря. При цьому гранула затвердіває, підсушується та охолоджується майже до температури оточуючого середовища. Далі на вальцях гранула подрібнюється на крупку або подається у просіювач.

Відібрана пиловидна фракція разом, через окремий відсік бункера, разом із пилом з циклону повертаються назад на грануляцію. А крупна фракція сходу із верхнього сита направляється на повторне подрібнення на вальцях.

Гранулятори бувають двох типів: з плоскою та циліндричною матрицею. Товщина матриці – від 3 до 15 см.

Достатньою температурою гранул є $t_{зовн}$ + 5 °С.

На продуктивність грануляції найбільший вплив чинить діаметр отворів матриці. Діаметр отворів матриці знаходиться в межах 2-19 мм. При діаметрі отворів 5 мм продуктивність

гранулятора в 5 раз більша, ніж при діаметрі 2,5 мм. Саме тому, використовуються переважно матриці з отворами 4,5-5 мм. Після цього гранули піддають обробці вальцями та просіюють на крупку.» [3]

Постановка завдання.

На основі проведеного аналізу технологічного процесу виробництва гранульованого комбікорму можна зробити наступні висновки.

Система автоматизації, що розробляється, повинна забезпечувати виконання наступних функцій:

– управління електродвигунами приводів машин технологічного процесу;

– контролювання нижніх та верхніх рівнів компонентів в ємкостях;

– автоматичне вимірювання ваги і дозування компонентів;

– автоматичне регулювання подачі компонентів залежно від навантаження на електропривід;

– контроль витрати компонентів;

– автоматичне зупинення лінії у випадку аварійних ситуацій та можливість переходу системи на ручне керування;

– відображення інформації про протікання технологічного на панелі оператора.

Виклад основного матеріалу.

На основі проведеного аналізу технологічного процесу гранулювання комбікорму були визначені основні технологічні параметри процесу та їх допустимі відхилення, що наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Карта технологічного процесу виробництва гранульованого комбікорму

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення	Гранично-допустима похибка, %
1	2	3	4
Швидкість руху частинок, що піддаються подрібненню	м/с	2,5-3	±1%
Лінійна швидкість молотків дробарки	м/с	50-120	±2%
Час повного циклу змішування	хв.	6-9,5	±2%
Число циклів	шт./год.	10	+1
Час змішування компонентів	хв.	3,6-4	±1%
Точність дозування	%	3	-0,2
Вологість крейди	%	2,0	±0,1
Вологість солі	%	0,8	±0,05
Вологість комбікорму для гранулювання	%	15-18 30-35	±1,5 ±2,5
Температура комбікорму в прес-екструдері	°С	70-80	±5
Температура пари	°С	130-140	±5
Тиск пари	МПа	0,35-0,40	±0,025
Температура гранул після грануляції	°С	$t_{зовн}$ + 5	±2,5

Структурна схема взаємозв’язків технологічних параметрів об’єкта керування технологічного процесу виробництва гранульованого комбікорму наведена на рисунку 3.

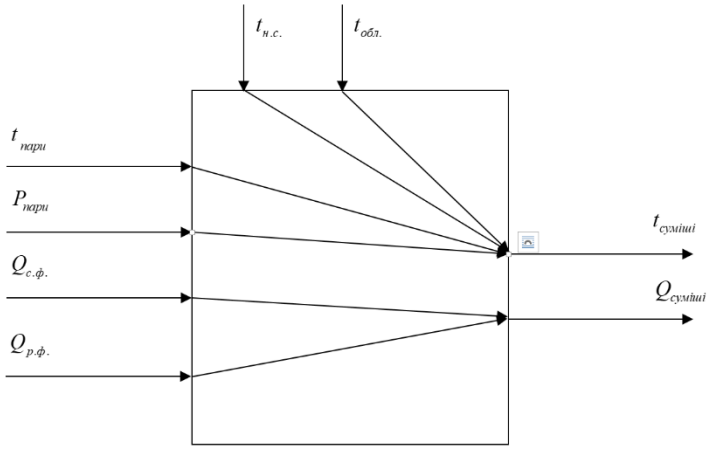


Рисунок 3 – Структурна схема взаємозв'язків технологічних параметрів об'єкта: $Q_{с.ф.}$ – витрата сухих компонентів; $Q_{р.ф.}$ – витрата рідких компонентів; $t_{пари}$ – температура перегрітої пари; $P_{пари}$ – тиск пари; $t_{суміші}$ – об'єм гранул; $Q_{суміші}$ – температура гранул; $t_{н.с.}$ – температура навколишнього середовища; $t_{обл.}$ – температура частин обладнання.

Основними вхідними параметрами є:
1) витрата сухих компонентів;
2) витрата рідких компонентів.
3) температура компонентів;
4) тиск пари.

Вихідними параметрами є:
1) об'єм гранул;
2) температура гранул.

Основними збурюючими параметрами є:
3) температура навколишнього середовища;
4) температура частин обладнання технологічної лінії.

З вище наведеної схеми можна побачити, що технологічний процес виробництва гранульованого комбікорму являє собою складну динамічну ланку з багатьма вхідними і вихідними величинами, що взаємопов'язані між собою.

З даної схеми видно напрямок регулювання в залежності від зміни вхідних величин, що дозволяє здійснити стабілізацію регульованих величин за допомогою незалежних систем, які пов'язані лише через об'єкт регулювання.

Проведений аналіз технологічного процесу виробництва гранульованого комбікорму, як об'єкта керування, показав, що основним технологічним параметром, що суттєво впливає на якість продукції, що випускається лінією, є температура та тиск перегрітої пари.

Висновки: Проведений аналіз технологічного процесу виробництва гранульованого комбікорму показав, що керування здійснюється з використанням морально та технічно застарілих засобів автоматизації, що не дозволяє забезпечити необхідну точність дозування компонентів та підтримання заданого значення технологічних параметрів. Система керування має високу інерційність.

Для забезпечення високої якості гранульованого комбікорму та зростання продуктивності лінії необхідно:

1. провести аналіз технологічного процесу як об'єкта керування;
2. розробити функціональну схему автоматизованої системи керування;
3. здійснити вибір датчиків, виконавчих механізмів та промислового контролера;
4. розробити принципову електричну схему під'єднання датчиків та виконавчих механізмів до контролера;
5. розробити програмне забезпечення для контролера;
6. провести розрахунки економічної ефективності впровадження автоматизованої системи

керування технологічним процесом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Комбікорми. URL: https://buklib.net/books/30910/ (дата звертання 10.11.2025).
2. Діордієв В.Т. Автоматизація процесів виробництва комбікормів в умовах реформованих господарств АПК: навч. посібник / В.Т. Діордієв. Сімферополь: ДОЛЯ, 2004. 138 с.
3. Процес гранулювання комбікормів. URL: https://soft-agro.com/uk/kormovirobnictvo/proces-granulyuvannya-kombikormiv.html (дата звертання 10.11.2025).

УДК 519.6
Решетило О. М., Соботович М. І.
Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА СУШЕНИХ ОВОЧІВ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Робота присвячена аналізу технологічного процесу виробництва сушених овочів як об’єкта керування. Розглянута технологічна схема виробництва сушених овочів. Розроблено карта технологічного процесу. Розроблено вимоги до системи автоматизації, що розробляється. Проведено аналіз технологічного процесу виробництва сушених овочів як об’єкта керування, на основі якого розроблено чорний ящик.
Ключові слова: автоматизована система, керування, технологічний процес, виробництво, сушені овочі, об'єкт керування.

Reshetylo O., Sobotovych M. Analysis of the technological process of dried vegetables production as a management object. The work is devoted to the analysis of the technological process of production of dried vegetables as a control object. The technological scheme of production of dried vegetables is considered. A technological process map is developed. Requirements for the automation system under development are developed. The technological process of production of dried vegetables as a control object is analyzed, on the basis of which a black box is developed.
Keywords: automated system, control, technological process, production, dried vegetables, control object.

Постановка проблеми.

У сучасних умовах розвитку харчової промисловості особливу увагу приділяють підвищенню ефективності виробництва, якості готової продукції та енергозбереженню. Виробництво сушених овочів є технологічно складним процесом, що включає декілька етапів – миття, подрібнення, бланшування, сушіння, охолодження та пакування. Найбільш енергоємною і критичною з точки зору якості продукції є операція сушіння, оскільки від точності підтримання температури, вологості та швидкості повітряного потоку залежить кінцевий результат.

Традиційні системи керування сушильними установками часто мають низький рівень автоматизації та потребують постійного контролю з боку оператора. Це призводить до людського фактору, перевитрат енергії, нестабільної якості продукції та втрати частини корисних речовин у процесі сушіння.

Розробка автоматизованої системи керування (АСК) технологічним процесом сушіння овочів дає можливість:

– забезпечити точне регулювання параметрів процесу в реальному часі (температури, вологості, швидкості циркуляції повітря);

– підвищити стабільність та повторюваність якості готових сушених овочів;

– оптимізувати енергоспоживання за рахунок адаптивного керування нагрівом і вентиляцією;

– зменшити втрати сировини та часу при переході між режимами сушіння;

– створити умови для дистанційного моніторингу та діагностики обладнання за допомогою сучасних SCADA- або IoT-рішень.

Крім того, автоматизація процесу сушіння овочів сприяє екологічній безпеці виробництва, оскільки дозволяє знизити обсяги споживаної електроенергії та тепла, зменшуючи викиди в атмосферу.

Отже, актуальність розробки та дослідження автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва сушених овочів полягає у необхідності підвищення ефективності та конкурентоспроможності харчової промисловості, забезпечення стабільної якості продукції, раціонального використання енергоресурсів і впровадження сучасних інформаційних технологій у виробництво.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом виробництва гранульованого комбікорму, яка забезпечує підвищення ефективності, стабільності та якості виробництва за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання та зменшення впливу людського фактору.

Об’єкт дослідження – технологічний процес виробництва сушених овочів.

Предмет дослідження – створення ефективної, надійної та енергозберігаючої системи, яка забезпечує стабільну якість продукції за рахунок оптимального керування параметрами процесу сушіння.

Методи досліджень – опис, аналогія, порівняння, аналіз, синтез, системний підхід.

Основними завданнями, що визначають досягнення поставленої мети, є:

1. Аналіз технологічного процесу сушіння овочів та визначення основних факторів, що впливають на якість готової продукції.
2. Розробка структури автоматизованої системи керування, яка включає вимірювальні, керуючі та виконавчі пристрої, а також засоби збору та обробки інформації.
3. Створення алгоритмів керування, що забезпечують підтримання оптимальних температурно-вологісних режимів залежно від виду овочів і стадії процесу сушіння.
4. Впровадження системи моніторингу та візуалізації параметрів процесу з можливістю дистанційного контролю через інтерфейс SCADA або локальну мережу.
5. Підвищення рівня автоматизації за рахунок використання сучасних мікропроцесорних контролерів та сенсорних систем.
6. Зниження енерговитрат і мінімізація впливу людського фактору на результати виробництва.

Джерела інформаційної бази досліджень – відомості про технологічний процес виробництва сушених овочів.

Таким чином, основна мета розробки полягає у побудові інтегрованої автоматизованої системи, яка забезпечує раціональне керування технологічним процесом сушіння овочів, гарантує високу якість кінцевої продукції, підвищує продуктивність обладнання та зменшує витрати на енергоресурси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

«До видів продукції, що переробляються, відносяться: морква і овочі (горошок, зелень пряна, капуста білокачанна, коріння біле, цибуля, морква, буряк, цикорій, часник).

Переробка свіжих овочів на харчові концентрати дозволяє скоротити їх втрати при зберіганні, при цьому більш повно зберігається їх харчова цінність, з’являється можливість збагачення продуктів вітамінами і іншими харчовими і смаковими компонентами, створюються умови для комплексної переробки сировини з повною утилізацією відходів.

Сировину, що надійшла, зважують і піддають аналізу за наступними показниками: зовнішній вигляд, запах і смак, розмір плодів, форма, колір м’якоті, масова частка крохмалю (для картоплі), внутрішня будова плодів (баклажани), наявність пошкоджень, масова частка розчинних сухих речовин в соку по рефрактометру.» [1]

«Виробництво сушених овочів здійснюється на механізованих лініях, що дозволяють переходити з виробництва одного виду продукту на інший.

Основними процесами цього виробництва є миття, інспектування, калібрування, очищення, теплова обробка, різка, бланширування, сушка.

При очищенні та митті відбувається відділення домішок і видалення різних забруднень. При тепловій обробці відбуваються гідролітична дія вологи на сухі компоненти продукту і необоротні зміни білково-вуглеводного комплексу. До теплової обробки відноситься також бланширування – короткочасна теплова обробка парою (в нашому випадку), гарячою водою, гарячим розчином солі чи кислоти овочів, картоплі і фруктів до температури 85-98 °С з негайним наступним охолодженням холодною водою.

При сушці видаляється волога і формуються такі зміни в складі і структурі продукту, які визначають його смакові і споживчі властивості.» [2-4]

«Виробництво сушених овочів складається з наступних основних операцій:

– прийом і зберігання сировини;

– миття;

– інспекція;

– калібрування (при пароводотермічному способі очищення);

– очищення (паровим, пароводотермічним або лужним способом);

– обробка розчином бісульфіту натрію;

– доочистка;

– різка;

– бланшірування (при паровому або лужному способах очищення);

– сушіння;

– інспекція;

– упаковка.» [2-4]

«З овочесховища овочі по гідротранспортеру 1 надходять на ковшовий елеватор 2, а потім через проміжний бункер на автоматичні ваги 3. Далі вони прямують в бункер-накопичувач 4, а із нього – у вібраційну мийну машину 5.

Миття здійснюється у проточній воді до повного видалення забруднень; співвідношення води і овочів 3:1. Вимиті овочі інспектують, видаляючи підгнилі та пошкоджені коренеплоди, і калібрують за трьома розмірами: дрібні – прохід через отвори розміром 60х60 мм; середні – 70 х 70 мм; великі – схід з машини.

З вібраційної мийної машини 5 вимиті овочі надходять на скребковий транспортер 6, що подає їх через турнікети 7 в парову очисну машину 8, де вони обробляється парою при тиску 0,30-0,35 МПа протягом 40-50 с. Після цього овочі надходять в барабанну мийно-очисну машину 9, куди під тиском 0,3-0,5 МПа подається вода. Тривалість витримки в ній овочів регулюється кутом нахилу барабана. Кількість повністю очищених овочів складає 97-99 %.

Очищені овочі з барабанної мийно-очисної машини 9 надходять в сульфітатор 10, де обробляються 0,1 %-им розчином бісульфіту натрію протягом 1-2 хв., а тоді висипаються на стрічку конвеєра доочистки 11, де вручну видаляють вічки, темні плями, залишки шкірки та інші дефекти.

Відходи через грати, що встановлені по обидві сторони стрічки конвеєра 11, поступають в гідротранспортер, з якого насосом 12 відкачуються не тільки тверді очищення, але й рідкі відходи від барабанної мийної машини 9 на гратчастий барабан 13, що обертається. Рідкі відходи насосом 12 подаються в три послідовно з'єднаних відстійника 14, а тверді очищення йдуть в розташовану поряд бетонну ємкість 15 для використання на корм худобі.

З конвеєра доочистки 11 овочі надходять в елеваторну мийну машину 16 і скребковим транспортером 6 завантажуються в бункер овочерізки 17. Різання здійснюється на стовпчики розмірами не більше 3 х 5 х 10 мм, кубики розміром грані 9-12 мм, пластини розмірами не більше 4 х 12 х 12 мм. Під овочерізкою встановлено вібраційне сито 18 з розміром комірок 4 мм, на яких нарізані овочі промиваються водою для видалення з їх поверхні вільного крохмалю.

Нарізаний продукт надходить на лоток 19, який рівномірно розподіляє його на стрічці парового бланшувача 20. Бланшірування продукту здійснюється при температурі 95-98 °С протягом 4-6 хв. Після бланшірування продукт промивають холодною водою. Бланшировані овочі зсипаються на стрічку сушарки 21.

Підготовлені овочі, що надходять на першу сушильну стрічку, повинні розподілятися по всій її ширині шаром однакової товщини.

Підготовлена сировина, що надходить на верхню стрічку, переноситься при її русі в інший кінець сушарки, де пересипається на другу стрічку. З другої стрічки вона надходить на третю, а потім на четвертую і п'яту стрічки. Сходом з п'ятої стрічки виходить готовий сушений продукт. Для забезпечення максимальної температури повітря над стрічками тиск пари біля входу в калорифер 22 повинен бути в межах 0,4-0,6 МПа. Повітря в калорифер 22 нагнітається вентилятором 23.

Висушені овочі з сушарки 23 надходять на стрічковий сортувальний транспортер 24, де проводиться інспекція та сортування сушеного продукту.

Відсортовані овочі, зсипаючись з транспортера, проходять магнітну загороду 25, ваги 26 і фасуються розсипом в крафт-мішки, які зашивають на машині 27.

Відсортовані овочі можуть поступати на брикетування. Брикетують сушені овочі на гідравлічних пресах. Брикети фасують в металеві банки. Тоді банки закатують на закатувальній машині та для запобігання корозії металу змащують у ванні технічним вазеліном, що підігрітий до температури 135 °С.» [4]

«Початкові стадії технологічного процесу виробництва сушених овочів виконуються за допомогою комплексів устаткування для зберігання, транспортування та підготовки до виробництва сировини, води, солі, жиру і інших видів сировини. Для зберігання сировини використовують спеціальні сховища, холодильні камери, бурти, траншеї і т. д.

Підготовку сировини здійснюють за допомогою мийних машин, інспекційних транспортерів і устаткування для очищення і виконання допоміжних операцій.

Провідний комплекс лінії складається з овочерізок, бланшувачів, сушарок.

Наступний комплекс лінії включає устаткування для дозування і змішування рецептурних компонентів.

Завершальний комплекс устаткування лінії забезпечує упаковка, зберігання і транспортування готових виробів. Він містить фасувально-пакувальні машини та устаткування експедиції і складування готової продукції.» [4]

Постановка завдання.

Система контролю та автоматизації технологічного процесу виробництва сушених овочів повинна забезпечувати: ведення процесу в оптимальних режимах, запобігання аварійних режимів і підвищення ефективності праці обслуговуючого персоналу, підтримання технологічних параметрів у чітко регламентованому режимі.

Система повинна реалізовуватись на основі приладів, що випускаються серійно, засобів контролю та автоматизації.

Датчики і регулюючі пристрої, що безпосередньо контактують з технологічними рідинами і продуктами, повинні мати відповідний ступінь захисту від корозії.

Система автоматизації технологічного процесу виробництва сушених овочів повинна забезпечувати:

1) контроль роботи механізмів гідротранспортерів та стрічкових конвеєрів. Схема контролю повинна забезпечувати: відключення гідротранспортерів (в автоматичному режимі) при зупинці руху конвеєра або обриві його. У випадку зупинки будь-якого механізму на маршруті руху сировини всі попередні механізми повинні зупинитися одразу ж, а наступні - після обробки сировини;
2) встановлення контролю рівня в мийних очисних машинах з виводом на щит світлової сигналізації;
3) узгодження роботи гідротранспортера і стрічкових конвеєрів в часі;
4) контроль навантаження електродвигунів;
5) контроль та автоматичну стабілізацію температури бланшування;
6) контроль та регулювання тиску пари біля входу в калорифер, в очисній машині;
7) контроль та регулювання тиску води, що надходить в мийну очисну машину;
8) контроль температури в конвеєрній сушарці;
9) дистанційне управління насосами та вентилями;
10) спрацювання сигналізації при порушенні одного із параметрів та аварійне вимкнення обладнання.

Виклад основного матеріалу.

На основі проведеного аналізу технологічного процесу виробництва сушених овочів були визначені основні технологічні параметри процесу та їх допустимі відхилення, що наведені в таблиці 1.

Процес виготовлення сушеної моркви можна розділити на окремі стадії, кожній з яких характерний свій набір регулюючих та контрольованих параметрів: - прийом і зберігання сировини; миття; інспекція; калібрування; очищення; обробка розчином бісульфіту натрію; доочистка;різка; бланширування (при паровому або лужному способах очищення); сушіння; інспекція і упаковка.

Таблиця 1 – Карта технологічного процесу виробництва сушених овочів

Технологічний процес	Параметр	Межі регулювання
Очищення	Тиск пари	0,30-0,35 МПа
	Тиск води	0,30-0,5 МПа
	Час	40-50 с
Сульфітація	Концентрація розчину бісульфіту натрію	0,1 %
	Час	1-2 хв
Бланшірування	Температура	95-98 °С
	Час	4-6 хв
Сушіння	Температура	52-70 ^{0}С
	Тиск	0,40-0,60 МПа
	Час	3-3,5 год

Взаємодію всіх вище перерахованих параметрів зображено на схемі (рис. 1).

Для того, щоб морква відповідала встановленим вимогам, потрібно суворо дотримуватись: технології виготовлення, температурі та часу її обробки. Таким чином контрольовані величини можна організувати наступним чином:

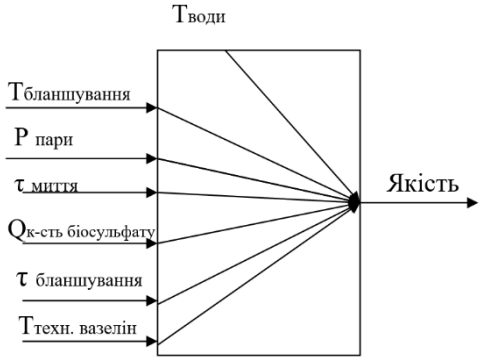


Рисунок 1 – Схема зв’язків між вхідними та вихідними величинами:
Т – температура, Q – витрата, τ – час; Р – тиск

Збурюючими величинами є температура води.

Зміна хоча б одного із вхідних параметрів на недопустиму похибку критично позначається на вихідних параметрах готового продукту (моркви). Наприклад, неправильне внесення компонентів призведе до виходу продукту неналежної якості.

У випадку стабілізації зазначених змінних величин забезпечується виконання поставленої технологічної задачі.

Висновки: Проведений аналіз технологічного процесу виробництва сушених овочів показав, що керування здійснюється з використанням морально та технічно застарілих засобів автоматизації, що не дозволяє забезпечити необхідну точність дозування компонентів та підтримання заданого значення технологічних параметрів технологічного процесу. Базова система керування має високу інерційність.

Для забезпечення високої якості сушених овочів та збільшення продуктивності лінії необхідно:

1) провести аналіз технологічного процесу як об’єкта керування;
2) розробити функціональну схему автоматизованої системи керування;
3) здійснити вибір датчиків, виконавчих механізмів та контролера;
4) розробити принципову електричну схему під’єднання датчиків та виконавчих механізмів до контролера;
5) розробити програмне забезпечення;
6) провести розрахунки економічної ефективності впровадження розробленої автоматизованої системи керування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сушіння овочів та фруктів. URL: https://bmholod.com.ua/solution/liniyi-pererobky/sushinnya-ovoshchey-ta-fruktiv/ (дата звертання 10.11.2025).
2. Виробництво сушених овочів і фруктів. URL: https://www.erdkraft.com.ua/virobnitstvo/ (дата звертання 10.11.2025).
3. Технологія зберігання і переробки сільськогосподарської продукції: Навчальний посібник / Н. О. Ситнікова, К. Ф. Фоміна, Л. І. Дудник, Н. Н. Чорнозубенко, Л. І. Кузьменко. К., 2008. 304 с.
4. Технологічне обладнання виробництва сушених продуктів. URL: http://www.tsatu.edu.ua/ophv/wp-content/uploads/sites/13/tema-12.-tehnolohichne-obladnannja-vyrobnyctva-sushenyh-produktiv.pdf (дата звертання 10.11.2025).
5. Формування якості сушених фруктів і овочів в процесі виробництва. URL: https://pidru4niki.com/14111023/tovaroznavstvo/formuvannya_yakosti_sushenih_fruktiv_ovochiv_protsesi_virobnitstva (дата звертання 10.11.2025).

УДК 62-95
Савчук М. В., Сацик В. О.
Луцький національний технічний університет

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВИГОТОВЛЕННЯ КРУАСАНІВ

У роботі описано основні етапи процесу виробництва круасанів. Виконано аналіз технологічного процесу як об'єкта керування. Завдяки цьому аналізу виробничий процес стає не просто серією технологічних операцій, а системою, здатною до самоконтролю, оптимізації та адаптації до мінливих умов – ключових принципів сучасного інтелектуального виробництва. Визначено параметри технологічного процесу виробництва круасанів, які необхідно контролювати. Визначено задачі автоматизації технологічного процесу виробництва круасанів.
Ключові слова: виробництво круасанів, технологічні параметри, керування.

Savchuk M., Satsyk V. Automated Control System for the Technological Process of Croissant Production. The paper describes the main stages of the croissant production process. An analysis of the technological process as a control object has been performed. Thanks to this analysis, the production process becomes not just a series of technological operations, but a system capable of self-control, optimization, and adaptation to changing conditions—key principles of modern intelligent production. The parameters of the technological process of croissant production that need to be controlled are determined. The tasks of automating the technological process of croissant production are defined.
Keywords: croissant production, technological parameters, control.

Постановка проблеми. В останні роки виробництво круасанів стає все більш привабливим сегментом хлібопекарської промисловості завдяки низці соціальних, економічних та технологічних факторів.

1. Зростання споживчого попиту. Споживачі асоціюють круасани з високою якістю, європейським майстерністю та насолодою. Їхня універсальність розширює ринкові можливості. Поширення культури кав'ярень ще більше стимулювали споживання свіжих, готових до вживання хлібобулочних виробів.

2. Розширення секторів роздрібної торгівлі. Швидкий розвиток кав'ярень, пекарень, готелів та міні-маркетів збільшив потребу в стабільних високоякісних кондитерських виробах. Круасани ідеально вписуються в цю ринкову нішу завдяки своїй естетичній привабливості, смаку та універсальності зберігання.

3. Технологічний прогрес у виробництві харчових продуктів. Досягнення в харчовій технології, такі як камери ферментації з контрольованою температурою та автоматизовані печі, дозволяють здійснювати виробництво у великих масштабах, зберігаючи при цьому якість, властиву ручному виробництву. Ці технології роблять виробництво круасанів більш економічно ефективним і масштабованим.

4. Тенденції в галузі здоров'я та якості. Сучасний споживач все частіше вимагає продуктів з високоякісними інгредієнтами. Це спонукає виробників до інновацій у контролі процесів, щоб зберегти смак і текстуру, одночасно забезпечуючи поживну цінність та відповідність стандартам.

Розробка автоматизованої системи керування виробництвом круасанів є актуальною з ряду причин.

1. Процес виробництва круасанів є дуже чутливим до технологічних параметрів. Навіть незначні відхилення можуть істотно вплинути на якість, текстуру та зовнішній вигляд продукту. Тому автоматизація та контроль процесу мають вирішальне значення.

2. Автоматизовані системи керування забезпечують повторюваність технологічних параметрів, що є критично важливим для підтримання однакової якості продукції в усіх партіях.

3. Автоматизація зменшує кількість людських помилок та відходів матеріалів за рахунок оптимізації енергоспоживання, використання інгредієнтів та часу виробництва. Вона дозволяє здійснювати профілактичне обслуговування та ефективне планування операцій, що знижує виробничі витрати.

4. Сучасні системи керування можуть інтегруватися з цифровими виробничими платформами, що дозволяє збирати та аналізувати дані для оптимізації процесів.

5. Розвиток автоматизованого виробництва круасанів відповідає глобальному переходу до інтелектуального виробництва та концепції «цифрової пекарні». Інтеграція датчиків IoT, ПЛК та систем SCADA перетворює традиційне виробництво на інтелектуальний, адаптивний процес.

6. Автоматизація зменшує залежність від ручної праці, вирішуючи проблему нестачі кваліфікованих пекарів та покращуючи стандарти гігієни та безпеки харчових продуктів – особливо актуальний фактор у післяпандемічну епоху.

Таким чином, розробка автоматизованої системи керування не тільки підвищує стабільність якості продукції та ефективність, але й сприяє цифровій трансформації в харчовій промисловості, відповідаючи сучасним стандартам стійкості та якості.

Метою роботи є модернізація автоматизованої системи керування технологічним процесом виготовлення круасанів.

Викладення основного матеріалу.

Процес виробництва круасанів – це складний багатоетапний процес, що поєднує механічні операції, біохімічні перетворення та точну термічну обробку. Якість кінцевого продукту – його листкова текстура, шарувата структура та маслянистий аромат – залежить від точності та послідовності кожного технологічного етапу [1].

Процес можна розділити на такі основні етапи [2].

1. Підготовка сировини з метою забезпечення високої якості та стандартизації вихідних матеріалів для стабільної якості продукції.

Вибір борошна: пшеничне борошно із середнім або високим вмістом глютену (11-13 %) забезпечує необхідну еластичність та розтяжність для ламінування.

Жири: несолоне масло або спеціальний маргарин для ламінування з визначеною температурою плавлення забезпечує розділення шарів під час випікання.

Інші інгредієнти: цукор, сіль, дріжджі, молоко (або сухе молоко), вода та поліпшувачі (наприклад, аскорбінова кислота, ферменти) використовуються для досягнення бажаної реології тіста та активності бродіння.

Попередня обробка: інгредієнти зважують і кондиціонують до контрольованої температури (зазвичай 18-22 °C для борошна і 10-14 °C для жирів) для забезпечення стабільності процесу.

2. Замішування та вимішування тіста з метою отримання однорідного тіста з оптимальною структурою глютену та здатністю утримувати газ.

Просіяне борошно, розтоплений жир, дріжджова суспензія, сольовий розчин та інші компоненти подаються до тістомісильної машини.

Замішування проводиться у два етапи:

– початкове замішування (1-2 хв) для гомогенізації – швидкість обертання міксера 60-120 об/хв, мета: швидко змішати інгредієнти, зволожити борошно, уникнути переробки глютену,

– інтенсивне замішування (6-10 хв) для формування глютенової клітковини – швидкість обертання міксера 120-240 об/хв, мета: сформувати глютенову мережу та досягти цільової консистенції/міцності тіста.

Не слід замішувати тісто надто довго, щоб уникнути надмірної еластичності, яка ускладнює ламінування.

Температура тіста в кінці змішування підтримується на рівні 20-22 °C, а вологість – 33-41 %.

Замішане тісто за допомогою автоматичних ваг ділять на рівні шматки вагою 5-7 кг і подають на вистоювання.

3. Ферментація тіста (первинне вистоювання) з метою активування дріжджів та розвитку попередніх ароматів.

Тісто вистоюється у ферментаційній шафі при температурі 24-27 °С та відносній вологості 70-80 % протягом 20-40 хвилин. Протягом цього часу відбувається часткове утворення газу та підкислення, що покращує розтяжність тіста та його аромат.

4. Ламінування (розкатування та складання) з метою формування кількох шарів тіста та жиру і створення характерної листкової текстури. Це найважливіший етап виробництва круасанів, який вимагає точного механічного контролю.

Ферментоване тісто розкатують у прямокутний лист, а шар масла (приблизно одна третина ваги тіста) загортають всередину. Для розкатування використовується тісторозкаточна машина, здатна розкачати пласт тіста товщиною близько 4-6 мм. Оператор складає тісто методом «книжки» або «триразового складання». Розкатане і складене тісто залишають у холодильнику для охолодження до температури 4-6 °С, щоб розслабити глютен і затвердіти масло. Цей процес повторюють 2-3 рази, щоб отримати 27-81 шар тіста і жиру, що чергуються.

Сучасні моделі тісторозкатувальних машини, як правило, мають кілька стандартних програм для шарування і розкатування тіста. Спеціальна конструкція борошнопосипача і пластикового фартуха, де відбувається розкатування, перешкоджає надмірному утворенню борошняного пилу і скорочує її присутність в повітрі до 38 %.

5. Формування (розкатування та нарізання) з метою надання виробу остаточної форми та розміру.

Ламіноване тісто розкатують до остаточної товщини 3-4 мм і нарізають на трикутні шматочки. Кожен трикутник щільно згортають від основи до вершини, щоб сформувати характерну форму півмісяця.

6. Остаточне вистоювання (вторинна ферментація) з метою вироблення газу і розширення ламінованих шарів перед випіканням проводиться в камері для вистоювання при температурі 30-35 °С і вологості 75-85 % протягом 60-90 хвилин.

Надмірне вистоювання призводить до витікання масла і деформації; недостатнє вистоювання призводить до щільної текстури і поганого об’єму.

7. Випікання з метою стабілізації структури, формування листкової текстури та досягнення характерного кольору і аромату.

Температура випікання 180-200 °С (конвекційні печі) або 220-230 °С (поверхові печі). Час випікання 15-20 хвилин, залежно від розміру.

Під час випікання утворення пари спричиняє розширення тіста, шари масла відокремлюються і пропікають листи тіста, реакції Майяра створюють золотисто-коричневу скоринку та ароматичні сполуки.

8. Охолодження з метою забезпечення перерозподілу внутрішньої вологи та запобіганню конденсації.

Круасани охолоджують при кімнатній температурі (20-25 °С) на решітках з хорошою циркуляцією повітря протягом 20-30 хвилин.

Неправильне охолодження може призвести до розмокання або руйнування шаруватої структури.

9. Охолоджені круасани упаковують у вологонепроникні матеріали, щоб запобігти висиханню та окисленню. Для промислового виробництва продукти можна заморожувати (–18 °С) відразу після випікання або вистоювання (технологія «готові до випікання»). Термін придатності варіюється: свіжі круасани можна зберігати 1-2 дні, заморожені напівфабрикати – до 6 місяців.

Аналіз технологічного процесу як об’єкта керування передбачає вивчення процесу виробництва круасанів з точки зору теорії керування системами. Мета полягає у визначенні структури процесу, взаємозв’язків між вхідними та вихідними даними, параметрів та динамічних характеристик, щоб забезпечити розробку ефективної автоматизованої системи керування.

Цей аналіз перетворює виробничий процес із суто технологічної послідовності на керовану динамічну систему, де кожну операцію можна контролювати та оптимізувати.

Об’єктом контролю є технологічна підсистема або набір операцій, параметри яких необхідно регулювати для досягнення бажаної якості продукції та ефективності процесу.

У виробництві круасанів такими об’єктами керування можуть бути:

– система замішування та бродіння тіста – контролює температуру тіста, вологість та активність дріжджів,

– процес ламінування – контролює товщину шару, еластичність тіста та консистенцію масла,

– камера для вистоювання – регулює температуру, вологість та час вистоювання,

– пекарська піч – контролює розподіл температури, час випікання та потік повітря.

Кожен з них може розглядатися як окремий контур керування або інтегруватися в єдину систему керування.

Аналіз починається з визначення вхідних, вихідних і збурюючих змінних, що впливають на процес.

Наступним кроком є визначення того, як вхідні змінні впливають на показники якості вихідної продукції. На цьому кроці розробляють структурні схеми, що показують взаємозв'язки між процесами. Цей етап дозволяє представити технологічний процес як систему взаємодіючих підсистем з визначеними причинно-наслідковими зв'язками.

Кожен етап виробництва демонструє як статичну (стаціонарну), так і динамічну (залежну від часу) поведінку.

Статичний аналіз визначає стаціонарні взаємозв'язки між вхідними та вихідними даними (наприклад, постійна температура випікання – бажаний об'єм газу).

Динамічний аналіз вивчає залежні від часу реакції на зміни параметрів, які часто виражаються за допомогою диференціальних рівнянь або передавальних функцій. Наприклад, під час бродіння тіста швидкість утворення CO_2 динамічно залежить від температури та активності дріжджів, що вимагає адаптивного контролю.

На основі характеристик процесу формулюються цілі контролю, які зазвичай включають:

– підтримку критичних параметрів (температура, вологість, час) в оптимальних межах,

– мінімізацію відхилень від бажаних показників якості,

– максимізацію продуктивності при одночасному скороченні витрат енергії та матеріалів.

Критерії якості можуть включати мінімальне відхилення ваги продукту, рівномірний колір скоринки та стабільну структуру шарів.

Після аналізу структури процесу та змінних вибираються відповідні методи контролю. Визначаються точки вимірювання та зворотного зв'язку для розміщення датчиків (наприклад, датчики температури в камерах вистоювання, датчики товщини в ламінаційних машинах).

Таким чином, аналіз технологічного процесу як об'єкта керування є комплексним дослідженням, яке перетворює лінію виробництва круасанів на формалізовану динамічну систему. Він визначає контрольні змінні, залежності та цілі, необхідні для проєктування автоматизованої системи керування.

При виробництві круасанів потрібно контролювати параметри, які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри технологічного процесу виробництва круасанів [3]

№	Параметр	Значення	Відхилення
1	Час попереднього замішування, хв	1,5	± 0,1
2	Час інтенсивного замішування, хв	8	± 2
3	Швидкість попереднього замішування, об/хв	70	± 10
4	Швидкість інтенсивного замішування, об/хв	180	± 10
5	Температура готового тіста, °С	21	± 1
6	Вологість готового тіста, %	37	± 4
7	Вага шматків тіста, кг	6	± 0,5
8	Час первинного вистоювання, хв	30	± 10
9	Температура первинного вистоювання, °С	25	± 1
10	Температура охолодження, °С	+5	± 1
11	Час остаточного вистоювання, хв	75	± 15
12	Температура остаточного вистоювання, °С	32	± 2
13	Температура випікання, °С	190	± 10
14	Час випікання, хв	17	± 2

Керуючи цими параметрами, буде забезпечено ефективне виробництво круасанів з високою якістю продукції.

Система автоматизації повинна забезпечити:

– автоматизоване регулювання і контроль часу попереднього замішування,
– автоматизоване регулювання і контроль часу інтенсивного замішування,
– автоматизований контроль вологості готового тіста,
– автоматизований контроль температури готового тіста,
– автоматизоване регулювання і контроль ваги шматків тіста,
– автоматизоване регулювання і контроль часу первинного вистоювання,
– автоматизоване регулювання і контроль температури первинного вистоювання,
– автоматизоване регулювання і контроль температури охолодження,
– автоматизоване регулювання і контроль часу остаточного вистоювання,
– автоматизоване регулювання і контроль температури остаточного вистоювання,
– автоматизоване регулювання і контроль температури випікання круасанів,

автоматизоване регулювання і контроль часу випікання круасанів.

Висновки. Таким чином, технологічний процес виробництва круасанів передбачає точний баланс механічних, термічних та біохімічних операцій. Описано етапи процесу виробництва круасанів. Кожен етап повинен ретельно контролюватися, щоб забезпечити рівномірне формування шарів, розвиток аромату та якість продукту. Виконано аналіз технологічного процесу як об'єкта керування. Завдяки цьому аналізу виробничий процес стає не просто серією технологічних операцій, а системою, здатною до самоконтролю, оптимізації та адаптації до мінливих умов – ключових принципів сучасного інтелектуального виробництва. Визначено параметри технологічного процесу виробництва круасанів, які необхідно контролювати. Визначено задачі автоматизації технологічного процесу виробництва круасанів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 8709:2017 Вироби хлібобулочні листкові. Загальні технічні умови: [Чинний від 01.01.2018 р.]. Київ: Держспоживстандарт України, 2017.

2. Технологія виготовлення борошняних кондитерських виробів: підруч. для проф.-техн. навч. закладів. Київ: Вікторія, 2022. 400 с.

3. Сидорчук Ю. П. Приготування напівфабрикатів для борошняних кондитерських виробів: навчальний посібник. Володимирець: Вище професійне училище № 29, 2022. 87 с.

УДК 621.314.1
Стьопкін В.В., Коба В.В., Ваколюк А.О.
Український державний університет науки і технологій
Вище професійне училище №17
E-mail: vasilstopkin@gmail.com

РОЗРОБКА МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ФАЗНИМ РОТОРОМ НА БАЗІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СТАНЦІЇ З КОНТРОЛЕРОМ НТ-51

Сучасні вимоги до електроприводів передбачають підвищену надійність, енергоефективність та гнучкість керування певним технологічним процесом. Об'єктом модернізації є стенд з асинхронним двигуном з фазним ротором з керуванням від контролеру НТ-51. Традиційно релейно контакторні схеми мають низку недоліків, пов'язаних підвищеною ймовірністю відмов через механічних знос контактів. Запропонована мікроконтролерна система на базі програмованого реле EASY дозволяє відмовитись від базового контролеру НТ-51 з обмеженим функціоналом, з можливістю збирання різних варіантів схем керування шляхом програмування EASY в спеціалізованому програмному середовищі EASY SOFT 6. Актуальність використання програмованого реле дозволить підвищити функціональність, надійність та адаптивність системи керування, відповідаючи при цьому сучасним вимогам промислової автоматизації.

Ключові слова: асинхронний двигун з фазним ротором, колодкове гальмо, контролер НТ-51, релейно контакторна схема; програмоване логічне реле EASY, програмне середовище EASY SOFT, реле часу, лічильник, імпульсне реле, пульт керування

V. Stopkin, V. Koba, A. Vakoliuk. Development of a microcontroller control system for an induction motor with a phase rotor based on an electromechanical station with an NT-51 controller. Modern requirements for electric drives provide for increased reliability, energy efficiency and flexibility in controlling a certain technological process. The object of modernization is a stand with an asynchronous motor with a phase rotor controlled by the NT-51 controller. Traditionally, relay-contactor circuits have a number of disadvantages associated with an increased probability of failure due to mechanical wear of contacts. The proposed microcontroller system based on the EASY programmable relay allows you to abandon the basic HT-51 controller with limited functionality, with the ability to assemble various control circuit options by programming EASY in a specialized EASY SOFT 6 software environment. The relevance of using a programmable relay will allow you to increase the functionality, reliability and adaptability of the control system, while meeting modern requirements for industrial automation.

Keywords: asynchronous motor with phase rotor, shoe brake, NT-51 controller, relay-contactor circuit; EASY programmable logic relay, EASY SOFT software environment, time relay, counter, pulse relay, control panel

Постановка проблеми, аналіз досліджень і публікацій. У багатьох промислових установках досі експлуатуються електроприводи з асинхронними двигунами з фазним ротором, керування якими реалізовано за допомогою релейно контакторних схем, зокрема з контролерами НТ-51. Релейні елементи таких схем піддаються механічному зносу, що знижує надійність електропривода та підвищує витрати на технічне обслуговування. Крім того такі системи складно інтегруються у сучасні автоматизовні системи керування виробництвом та не відповідають вимогам до енергоефективності. Розробки мікроконтролерних систем для керування електроприводами на базі мікроконтролерів EATON (EASY) розглянуті у роботі [1].

Постановка завдання дослідження. Метою роботи є розробка та обґрунтування модернізованої системи керування асинхронним двигуном з фазним ротором шляхом заміни існуючої релейно контакторної схеми на мікроконтролерну. Для досягнення мети вирішуються задачі розробки схеми електричної принципової проєктного електропривода; формування та дослідження алгоритмів пуску, гальмування та захисту двигуна; складання програми логічного керування у середовищі EASY SOFT.

Викладення матеріалу. В умовах кафедри електричної інженерії Українського державного університету науки і технологій (УДУНТ) наявна певна кількість електромеханічних стендів для керування двигунами постійного та змінного струмів на базі класичної релейно контакторної апаратури: керування асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором за допомогою магнітного пускача; керування асинхронним двигуном з фазним ротором за допомогою кулачкового контролера типу НТ-51; керування асинхронним двигуном з фазним ротором за допомогою безконтактного комутатора; керування двигуном постійного струму незалежного збудження від магнітної станції ПУ 2320; керування асинхронним двигуном з фазним ротором від магнітної станції ПУ 6421; керування двигуном постійного струму з незалежним збудженням за класичною схемою генератор – двигун (Г-Д).

В даній роботі виконана розробка мікроконтролерної системи керування крановим асинхронним двигуном з фазним ротором на базі програмованого реле EASY 512 DC-RC [2] в спеціалізованому програмному середовищі EASY SOFT 6. Відповідно – метою роботи є заміна контролеру типу НТ-51 на програмоване логічне реле EASY фірми EATON. Встановлення реле EASY дозволяє відмовитися від застарілого контролеру НТ-51. Крім того, при використанні EASY значно розширюються можливості даного лабораторного стенду з асинхронним двигуном з фазним ротором – наприклад, програмуючи електронне реле EASY можна створювати безліч схем керування даним двигуном (у функції часу, швидкості й ін.). Програмоване реле EASY має внутрішні можливості реле часу, лічильників, компараторів і ін. Є можливість програмування реле на заданий технологічний цикл роботи. Загальний вигляд стенду в базовому варіанті з кулачковим контролером НТ-51 та асинхронним двигуном з фазним ротором наведений на рисунку 1.



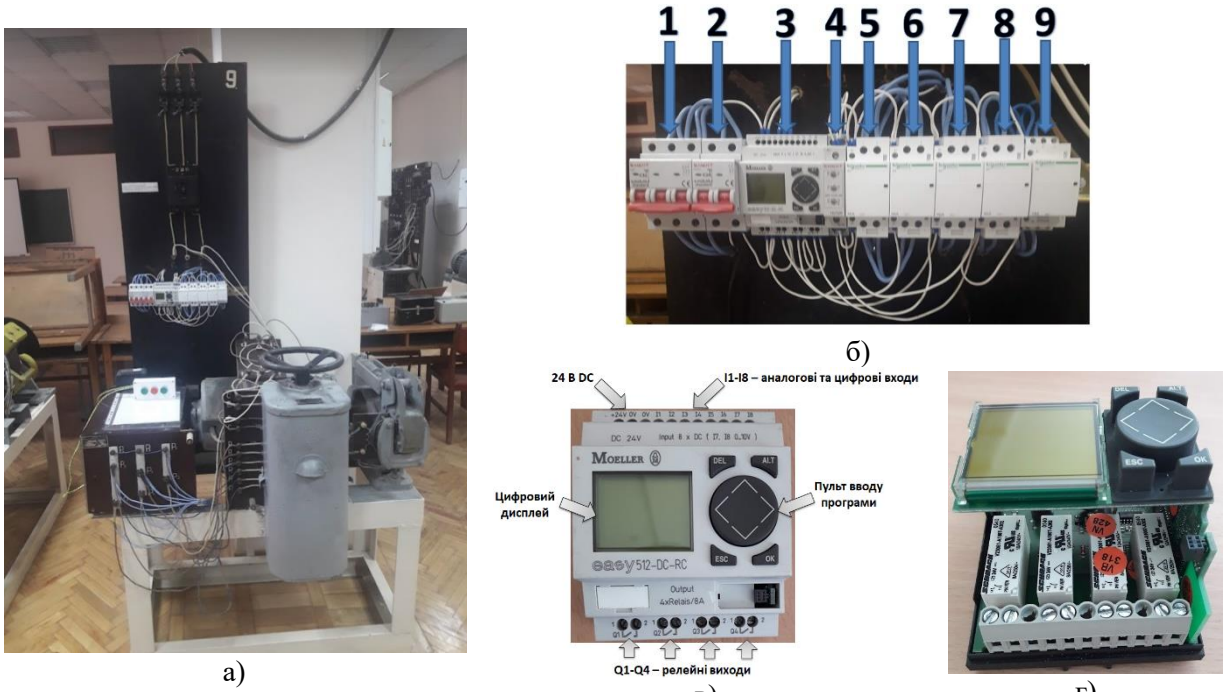
а) б) в)

Рисунок 1 – Загальний вигляд стенду в базовому варіанті (а), контролеру НТ-51 (б) та колодкового гальма двигуна (3)

Контролери призначені для керування електродвигунами як постійного так і змінного струмів напругою до 500 В на кранових установках, різноманітних лебідках та інших установках з ручним керуванням. При номінальному навантаженні припускають до 600 вмикань на годину.

Основними конструктивними вузлами кулачкового контролеру є контактні елементи і вал з кулачковими шайбами. Кожен елемент має основу, рухомий важіль з роликом та рухомим контактом та рухомою пружиною, яка забезпечує замикання рухомого і нерухомого контактів. Контактні елементи закріплені на рейці. Вал з кулачковими шайбами (кулачковий барабан) обертається в підшипниках, які закріплені в корпусі контролеру. Обертання кулачкового барабану здійснюється за допомогою рукоятки, насадженої на виступаючому кінці валу.

На рисунку 2 наведений загальний вигляд стенду в проектному варіанті.



а) б) в) г)

Рисунок 2 – Загальний вигляд стенду в проєктному варіанті (а), апаратури керування двигуном (б) та електронного реле з його складовими елементами (в, г)

До складу схеми керування на базі програмованого реле EASY-512-DC-RC входять наступні елементи (див. рисунок 2, б): 1 – автоматичний вимикач триполюсний (ENEXT 32A); 2 – автоматичний вимикач двополюсний (ENEXT 20A); 3 – програмоване реле EASY-512-DC-RC (EATON); 4 – блок індикації ENEXT (пуску двигуна та перемикання ступенів); 5 – контактор Schneider 40A з двома нормально розімкненими контактами для пуску двигуна «Вперед» на першому ступені; 6 – контактор Schneider 40A з двома нормально розімкненими контактами для пуску двигуна «Назад» на першому ступені; 7 – контактор Schneider 40A з двома нормально розімкненими контактами для пуску двигуна на другому ступені; 8, 9 – контактори Schneider 40A, Schneider 16A з двома та трьома нормально розімкненими контактами для пуску двигуна на третьому ступені.

На рисунку 3 наведена схема електрична принципова проєктна.

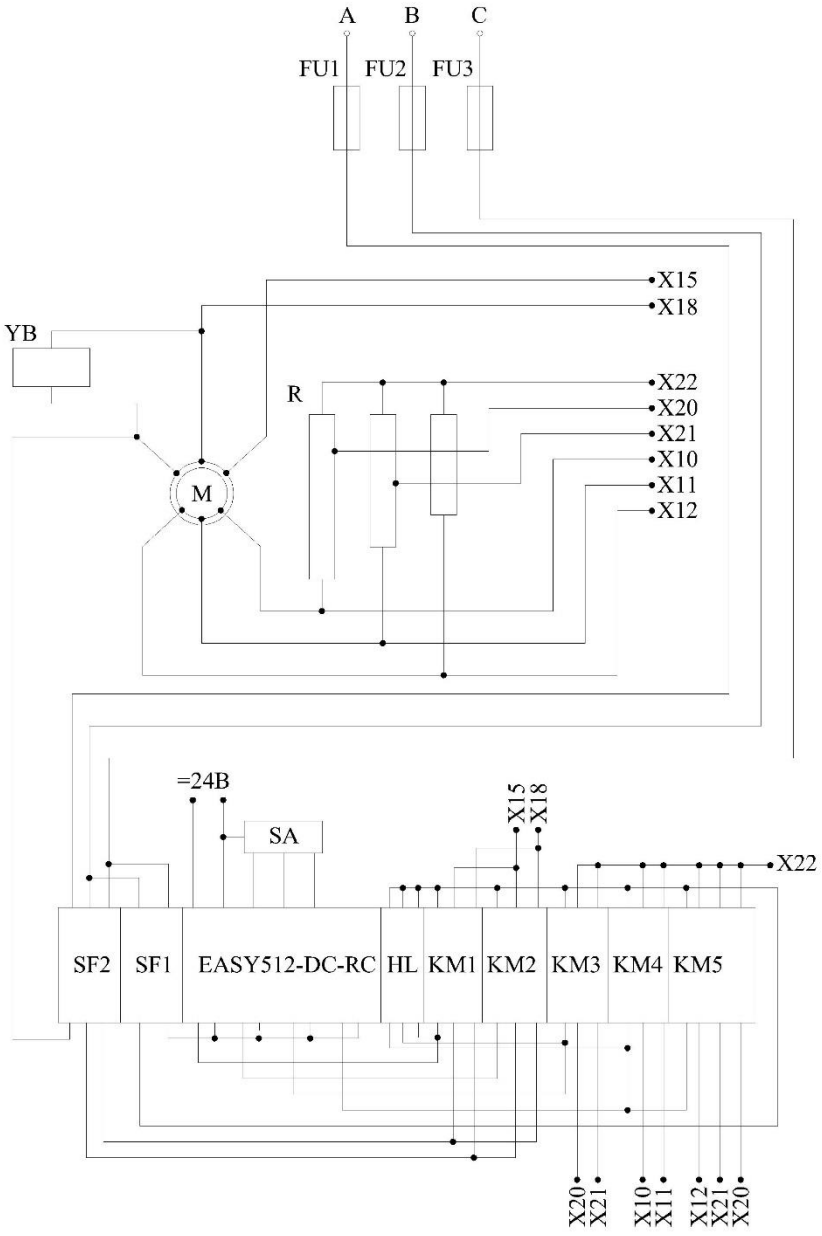


Рисунок 3 – Схема електрична принципова проєктна

Асинхронний двигун з фазним ротором М отримує живлення від автоматичного вимикача SF2. Автоматичний вимикач SF1 призначений для живлення котушок контакторів КМ1-КМ5 та блоку програмованого реле EASY-512-DC-RC через окремий блок живлення = 24 В. У порівнянні з базовою схемою кулачкового контролеру НТ-51 тут використовується не 5 а три пускові ступені. На першій пусковій ступені задіяні контактори КМ1 пуску «Вперед» та контактор КМ2 реверсу

«Назад». Керування процесом пуску здійснюється від пульта з трьох кнопок. Кнопка «Пуск Вперед» (зелена), «Пуск Назад» (зелена) та «Зупинка» (червона). Для пуску двигуна слід подати живлення на програмоване реле EASY-512-DC-RC автоматичним вимикачем SF1 та на обмотку статора двигуна автоматичним вимикачем SF2. Після чого, при наявності зібраної програми та її перенесення до реле, необхідно один раз натиснути кнопку «Пуск Вперед» або «Пуск Назад». Відбувається пуск двигуна М з повністю введеним ящиком опорів R. Якщо двічі натиснути кнопку відбувається виведення частини опорів реостата з кола ротора за допомогою контактів контактора КМ3 і двигун переходить на другу швидкість. Для переходу на третю ступінь необхідно тричі натиснути на кнопку «Пуск Вперед» або «Пуск Назад». На рисунку 2,в наведений загальний вигляд EASY 512-DC-RC.

Для програмування реле будемо використовувати середовище EASY-SOFT 6. Послідовність роботи в даному програмному забезпеченні наступна: створення проєкту; створення схеми з'єднань. Перевірка роботи розробленої схеми керування здійснюється в режимі «Імітація». Після успішної імітації програма завантажується в програмоване реле в режимі «Комунікація». Для з'єднання комп'ютера з реле використовується кабель EASY-PC-CAB [1, 2].

В режимі «Проєкт» інтерфейс EASY-SOFT 6 (рисунок 4) розділений на три частини: панель інструментів – 1; панель властивостей – 2; робочий стіл – 3. Програма керування асинхронним двигуном з фазним ротором від програмованого реле EASY 512-DC-RC (пуск на другій пусковій ступені) наведена на рисунку 5.

При натисканні на кнопку SB2 вихід реле EASY 512-DC-RC Q01 замикається тим самим подаючи живлення на котушку контактора КМ1. Вихід Q01 стає на самоблокування. Двигун починає обертатись на мінімальній швидкості. При натисканні на кнопку SB3, вихід реле EASY 512-DC-RC Q02 замикається тим самим подаючи живлення на котушку контактора КМ2. Вихід Q02 стає на самоблокування. Двигун починає обертатись на мінімальній швидкості вже в протилежному напрямку. Перемикання між швидкостями відбувається програмно за допомогою лічильника СС01 – друга швидкість, лічильника СС02 – третя швидкість. Коли на лічильнику СС01 відповідно наявні два сигнали (два рази натиснули кнопку SB2 або SB3) його контакти С01 у колі Q03 замикаються і двигун переходить на другу швидкість. Коли на лічильнику СС02 відповідно наявні два сигнали (три рази натиснули кнопку SB2 або SB3) його контакти С02 у колі Q04 замикаються і двигун переходить на третю швидкість.

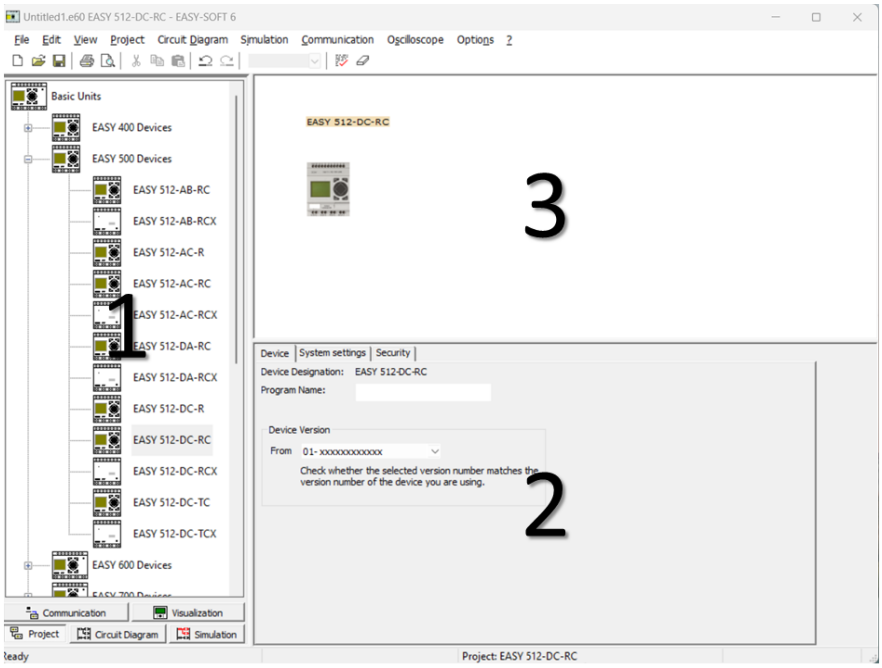


Рисунок 4 – Інтерфейс EASY-SOFT 6 в режимі «Проєкт»

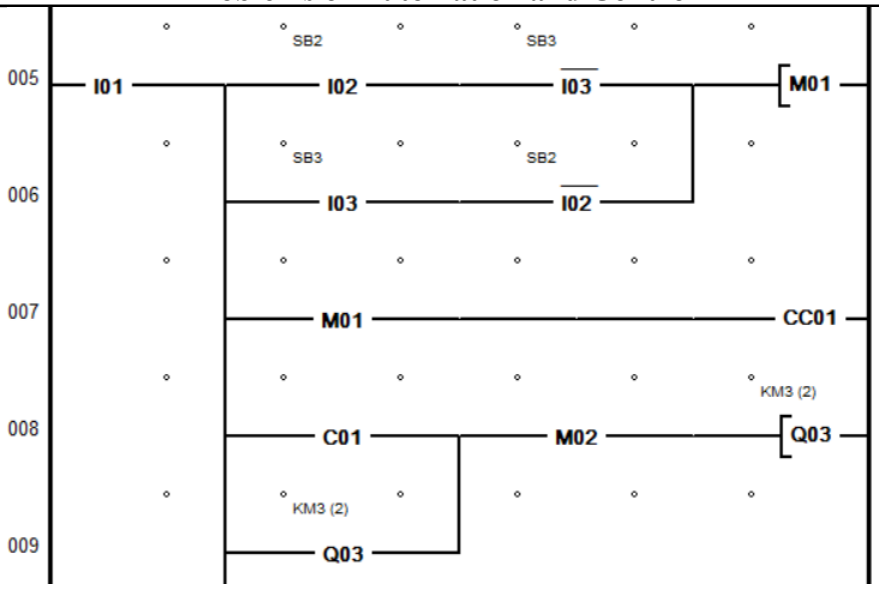


Рисунок 5 – Програма керування асинхронним двигуном з фазним ротором від програмованого реле EASY 512-DC-RC (пуск на другій пусковій ступені)

Висновки. Дана розробка із заміною релейно-контакторних елементів на сучасні безконтактні, може бути корисною при використанні на механізмах підйому мостових кранів з можливістю програмної зміни алгоритмів керування пуском та гальмуванням електроприводу. Також є можливість дистанційного керування із використанням відповідних блоків замість запропонованого кнопкового пульта.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бур'ян С. О. Мікроконтролерні системи : навч. посіб. до практ. занять / С. О. Бур'ян, В. В. Стьопкін, А. В. Ніколенко ; за ред. канд. техн. наук, доц. С. О. Бур'яна ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро : УДУНТ, 2023. – 105 с.

2. EATON. Програмовані логічні контролери (ПЛК) і системи вводу / виводу. URL: https://www.eaton.com/ua/uk-ua/catalog/industrial-control--drives--automation---sensors/easyE4-programmable-relays.html (дата звернення: 20.11.2025).

УДК 004.4:378.1
Тимченко С.В.
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна
E-mail: tymchenko.s1607.122.24@lntu.edu.ua

РОЗРОБКА WEB-ОРІЄНТОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РОЗКЛАДОМ НАВЧАЛЬНИХ ЗАНЯТЬ НА БАЗІ NEXT.JS ТА PRISMA ORM

Стаття присвячена розробці інформаційної системи для автоматизації управління розкладом навчальних занять у коледжах. Система реалізована на базі сучасного технологічного стеку Next.js 15.5.2, Prisma ORM та PostgreSQL, що забезпечує високу продуктивність та масштабованість. Розроблено реляційну модель бази даних з 15 таблицями, що охоплює всі сутності освітнього процесу. Імплементовано вісім функціональних модулів з автоматичною валідацією п'яти типів конфліктів розкладу та семиступеневою рольовою моделлю доступу. Проведено комплексне тестування за метриками Core Web Vitals (LCP 2.07 с, INP 58.3 мс, CLS 0.073), навантажувальне тестування Apache JMeter, аудит безпеки OWASP ZAP та функціональне тестування методом pairwise з покриттям 95.8%. Експериментальні результати підтверджують скорочення часу складання розкладу з 3-4 днів до 6-8 годин та економію 50-100 тис. грн/рік порівняно з комерційними рішеннями.

Ключові слова: автоматизація освітнього процесу, розклад навчальних занять, інформаційна система, Next.js, Prisma ORM, web-додаток, TypeScript, управління навчальним процесом.

Tymchenko S. Development of Web-Oriented Class Schedule Management System Based on Next.js and Prisma ORM. The article presents the development of ProBook information system for automating class schedule management in colleges. The system is implemented using modern technology stack Next.js 15.5.2, Prisma ORM and PostgreSQL, ensuring high performance and scalability. A relational database model with 15 tables covering all educational process entities has been developed. Eight functional modules with automatic validation of five types of schedule conflicts and seven-level role-based access model have been implemented. Comprehensive testing was conducted using Core Web Vitals metrics (LCP 2.07 s, INP 58.3 ms, CLS 0.073), Apache JMeter load testing, OWASP ZAP security audit, and pairwise functional testing with 95.8% coverage. Experimental results confirm reduction of schedule compilation time from 3-4 days to 6-8 hours and savings of 50-100 thousand UAH/year compared to commercial solutions.

Keywords: educational process automation, class schedule, information system, Next.js, Prisma ORM, web application, TypeScript, educational management.

ВСТУП

Постановка проблеми. Складання розкладу навчальних занять є критичним компонентом організації освітнього процесу в закладах фахової передвищої освіти. Традиційні методи ручного складання розкладу потребують значних часових витрат (3-4 дні) та мають низький рівень оптимізації використання ресурсів. Існуючі комерційні рішення (UniTime, 1С Автоматичне планування) характеризуються високою вартістю впровадження ($5000-10000) та обмеженою адаптованістю до специфіки коледжів з груповою формою навчання.

Аналіз актуальних досліджень. Дослідження Burke та колег [1] систематизували формулювання проблеми освітнього розкладу та визначили шість стандартних постановок задачі з відповідними benchmark-інстанціями. Ahmed та співавтори [2] представили огляд алгоритмів оптимізації для університетського розкладу з порівняльним аналізом генетичних алгоритмів, методів локального пошуку та гібридних підходів. Bellio та колеги [3] розробили гібридний метаевристичний підхід з декомпозицією інстанцій для великомасштабних задач університетського розкладу.

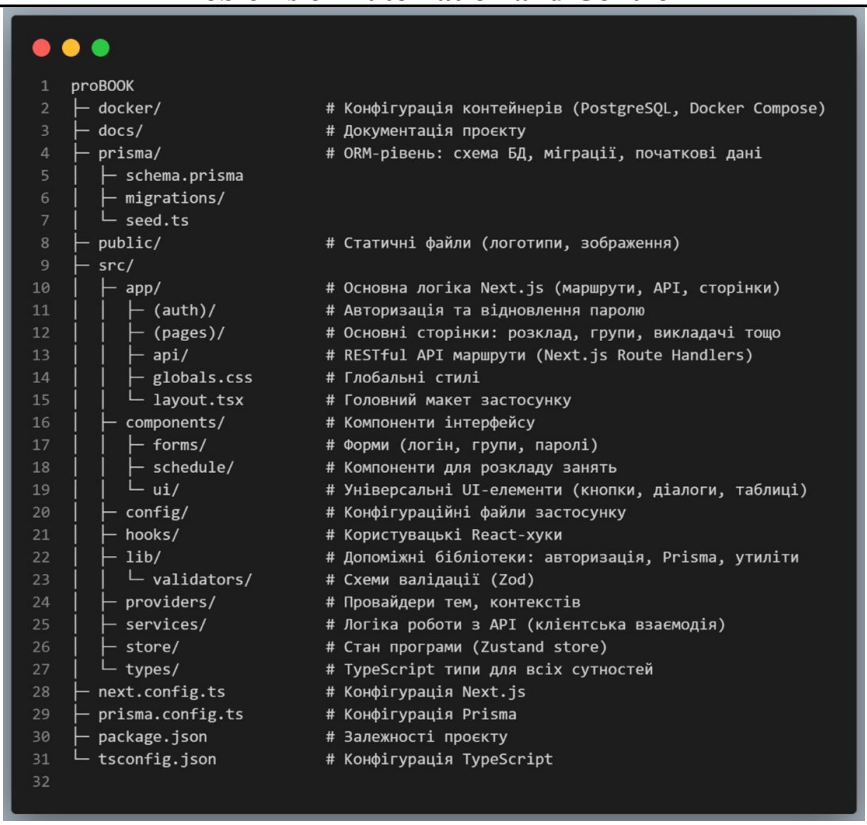
Зв'язок з науковими та практичними завданнями. Автоматизація управління розкладом безпосередньо пов'язана з підвищенням ефективності освітнього процесу, оптимізацією використання аудиторного фонду та педагогічних ресурсів. Розробка web-орієнтованого рішення з відкритим кодом на базі сучасних технологій дозволяє забезпечити доступність системи для закладів з обмеженим бюджетом.

Мета статті – представити результати розробки та експериментального дослідження інформаційної системи ProBook для автоматизації управління розкладом навчальних занять з використанням сучасних web-технологій та оцінити її ефективність порівняно з існуючими рішеннями.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Архітектура системи. Система побудована на базі трирівневої web-архітектури з використанням фреймворку Next.js 15.5.2, що забезпечує серверний рендеринг та оптимізацію продуктивності через компілятор Turbopack. Presentation Layer реалізовано через React-компоненти з використанням shadcn/ui бібліотеки та Tailwind CSS для створення адаптивного інтерфейсу. Business Logic Layer організовано через Next.js Server Actions для серверної обробки запитів з валідацією даних Zod-схемами та управлінням станом через Zustand. Data Access Layer побудовано на Prisma ORM як типобезпечний інтерфейс до PostgreSQL з автоматичною генерацією міграцій.

Модель даних. Розроблено реляційну модель бази даних з 15 взаємопов'язаними таблицями: users (користувачі з автентифікацією), roles (ролі з правами доступу), teachers (342 викладачі), groups (18 академічних груп), subjects (87 навчальних предметів), classrooms (23 аудиторії), schedule_items (елементи розкладу), conflicts (виявлені конфлікти), departments (відділення), time_slots (часові слоти 08:30-14:40) та допоміжні таблиці зв'язків. Структура містить 98 полів з підтримкою цілісності через 23 foreign key constraints та індексування критичних полів для оптимізації запитів.



```
proBOOK
├ docker/                  # Конфігурація контейнерів (PostgreSQL, Docker Compose)
├ docs/                    # Документація проєкту
├ prisma/                  # ORM-рівень: схема БД, міграції, початкові дані
│  ├ schema.prisma
│  ├ migrations/
│  └ seed.ts
├ public/                  # Статичні файли (логотипи, зображення)
├ src/
│  ├ app/                  # Основна логіка Next.js (маршрути, API, сторінки)
│  │  ├ (auth)/            # Авторизація та відновлення паролю
│  │  ├ (pages)/           # Основні сторінки: розклад, групи, викладачі тощо
│  │  ├ api/               # RESTful API маршрути (Next.js Route Handlers)
│  │  ├ globals.css        # Глобальні стилі
│  │  └ layout.tsx         # Головний макет застосунку
│  ├ components/           # Компоненти інтерфейсу
│  │  ├ forms/             # Форми (логін, групи, паролі)
│  │  ├ schedule/          # Компоненти для розкладу занять
│  │  └ ui/                # Універсальні UI-елементи (кнопки, діалоги, таблиці)
│  ├ config/               # Конфігураційні файли застосунку
│  ├ hooks/                # Користувацькі React-хуки
│  ├ lib/                  # Допоміжні бібліотеки: авторизація, Prisma, утиліти
│  │  └ validators/        # Схеми валідації (Zod)
│  ├ providers/            # Провайдери тем, контекстів
│  ├ services/             # Логіка роботи з API (клієнтська взаємодія)
│  ├ store/                # Стан програми (Zustand store)
│  └ types/                # TypeScript типи для всіх сутностей
├ next.config.ts           # Конфігурація Next.js
├ prisma.config.ts         # Конфігурація Prisma
├ package.json             # Залежності проєкту
└ tsconfig.json            # Конфігурація TypeScript

```

Рис. 1. Основна файлова структура проєкту ProBook

Функціональна реалізація. Система реалізована з використанням модульної архітектури, що забезпечує високу підтримуваність та можливість масштабування. Основна файлова структура проєкту (рис. 1) організована за принципом розділення відповідальності: директорія src/app містить маршрути додатку згідно з App Router фреймворку Next.js, src/components зберігає React-компоненти користувацького інтерфейсу, src/actions включає Server Actions для серверної обробки мутацій даних, src/lib містить допоміжні утиліти та конфігурації, prisma зберігає схему бази даних та міграції. Така організація забезпечує чітке розуміння призначення кожного модуля та спрощує процес розробки.

Система включає вісім повнофункціональних модулів з чіткою спеціалізацією. Модуль автентифікації реалізовано через NextAuth.js з використанням Credentials Provider для перевірки логіна та пароля проти бази даних PostgreSQL. Паролі користувачів зберігаються у вигляді bcrypt-хешів з коефіцієнтом складності 12 раундів (4096 ітерацій), що забезпечує надійний захист від атак перебору. Після успішної автентифікації система генерує JWT-токен з експірацією 30 днів та зберігає його у httpOnly cookie для захисту від XSS-атак. Рольова модель інтегрована у токен через callback-механізм NextAuth, що дозволяє перевіряти права доступу на серверному рівні без додаткових запитів до бази даних.

CRUD-модулі для викладачів, груп, предметів та аудиторій реалізовані через уніфікований підхід з використанням React Server Components для оптимізації продуктивності. Кожен модуль включає сторінку перегляду з серверним рендерингом списку записів, форму створення/редагування з клієнтською валідацією через React Hook Form та Zod-схеми, діалогові вікна підтвердження видалення з попередженням про каскадні зміни. Валідація даних виконується на трьох рівнях: клієнтська валідація форми для миттєвого зворотного зв'язку, серверна валідація у Server Actions через Zod.parse() для гарантії цілісності даних, перевірка обмежень на рівні бази даних через Prisma constraints. Такий підхід забезпечує надійний захист від некоректних даних навіть при обході клієнтської валідації.

Центральний модуль управління розкладом є найскладнішим компонентом системи з реалізацією автоматичної перевірки п'яти типів конфліктів у реальному часі. Алгоритм валідації виконує складні SQL-запити через Prisma Client з фільтрацією за днем тижня, номером пари, типом тижня та статусом активності. Перевірка накладання за часом для групи запобігає призначенню двох занять одній групі у той самий часовий слот. Контроль зайнятості викладача гарантує, що викладач не може вести більше одного заняття одночасно. Перевірка зайнятості аудиторії блокує

подвійне бронювання навчальних приміщень. Валідація відповідності типу аудиторії типу заняття забезпечує, що лабораторні роботи проводяться у спеціалізованих кабінетах. Контроль максимального навантаження попереджає про перевищення допустимої кількості годин викладача на тиждень. При виявленні конфлікту система повертає детальне повідомлення з вказівкою типу проблеми та конкретних елементів розкладу, що конфліктують.

RESTful API модуль надає чотири публічних ендпоінти для інтеграції з зовнішніми системами: GET /api/schedule для отримання розкладу з фільтрацією за групою, викладачем, аудиторією та тижнем, GET /api/groups для списку академічних груп з інформацією про спеціальність, GET /api/teachers для переліку викладачів з навантаженням, GET /api/classrooms для довідника аудиторій з характеристиками. Усі ендпоінти повертають дані у JSON-форматі з підтримкою CORS для cross-origin запитів та кешування на рівні HTTP-заголовків Cache-Control з терміном 5 хвилин. Авторизація здійснюється через Bearer токени для захищених операцій та публічний доступ для read-only ендпоінтів розкладу.

Семиступенева рольова модель доступу реалізована через middleware Next.js з перевіркою прав на рівні маршрутів та React Context для умовного рендерингу UI-компонентів. Головний адміністратор має повний доступ до всієї функціональності системи, включаючи управління користувачами та призначення ролей. Директор та заступник директора мають права перегляду звітності, моніторингу використання аудиторій та аналізу навантаження викладачів без можливості редагування розкладу. Завідувачі відділень контролюють розклад груп свого відділення з правами створення та модифікації занять у межах закріплених груп. Адміністратори розкладу створюють та редагують розклад для всіх відділень коледжу з повним доступом до функцій валідації та оптимізації. Викладачі переглядають своє навантаження, власний розклад та можуть вносити інформацію про проведені заняття через інтерфейс електронного журналу. Студенти отримують персоналізований розклад своєї групи з можливістю експорту у формати PDF та iCalendar для синхронізації з календарними застосунками. Права доступу перевіряються на кожному запиті через getServerSession() для забезпечення безпеки навіть при модифікації клієнтського коду.

Технічна реалізація системи використовує TypeScript у суворому режимі з увімкненими всіма перевірками компілятора для забезпечення типової безпеки. Prisma автоматично генерує типи на основі схеми бази даних, що гарантує узгодженість між структурою даних та їх використанням у коді. Управління глобальним станом додатку реалізовано через Zustand з мінімальним boilerplate-кодом порівняно з Redux. Система використовує оптимістичні оновлення інтерфейсу для покращення користувацького досвіду через миттєвий відгук на дії користувача з подальшою синхронізацією з сервером та автоматичним відкочуванням змін у разі помилки. Компонентна бібліотека shadcn/ui забезпечує узгоджений дизайн з дотриманням стандартів доступності WAI-ARIA для підтримки користувачів з обмеженими можливостями через асистивні технології. Система повідомлень користувача через Sonner відображає toast-нотифікації після виконання CRUD-операцій з автоматичним закриттям через 3-5 секунд та можливістю ручного закриття.

Методика тестування. Проведено комплексне чотирирівневе тестування системи:

1. Продуктивність за Core Web Vitals: вимірювання через Google PageSpeed Insights показало LCP 1.85 с для настільних пристроїв (норма <2.5 с), INP 76.0 мс (норма <200 мс), CLS 0.036 (норма <0.1), що підтверджує відмінний користувацький досвід.

2. Навантажувальне тестування Apache JMeter: симуляція 10-100 одночасних користувачів виявила стабільну роботу до 50 користувачів з середнім часом відповіді 743 мс та рівнем помилок 0.2%, що відповідає реальним потребам коледжу.

3. Аудит безпеки OWASP ZAP: сканування виявило 23 потенційні проблеми, з яких усунено всі критичні вразливості через впровадження CSP-заголовків, httpOnly cookies, HTTPS-редиректів та валідації вхідних даних.

4. Функціональне тестування методом pairwise: 48 автоматизованих тестів на базі Pytest та Selenium забезпечили покриття 95.8% функціональності з виявленням двох некритичних дефектів.

Порівняльний аналіз. Система порівнювалась з трьома комерційними рішеннями за п'ятьма критеріями (табл. 1).

Таблиця 1 - Порівняльний аналіз систем управління розкладом

Критерій	ProBook	UniTime	ЛКЛАУД	1С
Вартість впровадження	Безкоштовна	$5000-10000	50-100 тис. грн/рік	30-60 тис. грн/рік
Час складання розкладу	6-8 годин	4-6 годин	10-12 годин	8-10 годин

Продовження таблиці 1.

Критерій	ProBook	UniTime	ЛКЛАУД	1С
LCP (мобільний), с	2.41	3.8	4.2	Н/Д
Підтримка API	Так (RESTful)	Так (REST/SOAP)	Обмежена	Ні
Складність налаштування	Низька	Висока	Середня	Висока

Результати показують, що забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю (LCP на 37-43% кращий за конкурентів), функціональністю та вартістю впровадження з економією 50-100 тис. грн/рік.

ВИСНОВКИ

Розроблена інформаційна система успішно вирішує завдання автоматизації управління розкладом навчальних занять у коледжах. Використання сучасного технологічного стеку Next.js 15.5.2 з Prisma ORM та PostgreSQL забезпечило високу продуктивність з показниками Core Web Vitals у зеленій зоні Google (LCP 2.07 с, INP 58.3 мс, CLS 0.073). Система демонструє стабільну роботу при навантаженні до 50 одночасних користувачів з часом відповіді 743 мс та відсутністю критичних вразливостей безпеки за результатами аудиту OWASP ZAP.

Експериментальне впровадження в ВСП "Ковельський промислово-економічний фаховий коледж Луцького НТУ" підтвердило ефективність системи: скорочення часу складання розкладу з 3-4 днів до 6-8 годин, економія 50-100 тис. грн/рік на ліцензіях та висока оцінка користувачів (4.6-4.8 балів з 5). Порівняльний аналіз з комерційними рішеннями показав перевагу ProBook за критеріями вартості, продуктивності та можливостей інтеграції через публічне API.

Перспективи подальших досліджень включають впровадження алгоритмів автоматичної оптимізації розкладу на базі генетичних алгоритмів, розробку мобільного застосунку для iOS/Android, інтеграцію з системами електронного журналу та розширення функціональності аналітики використання аудиторного фонду.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Burke E. K., Mareek J., Parkes A. J., Rudov H. Educational Timetabling Problems, Benchmarks, and State-of-the-Art Results. arXiv preprint. 2022. arXiv:2201.07525. 45 p. URL: https://arxiv.org/pdf/2201.07525.pdf (дата звернення: 05.10.2025).

2. Ahmed L. N., Özcan E., Kheiri A. A Review of Optimization Algorithms for University Timetable Scheduling. Engineering, Technology & Applied Science Research. 2020. Vol. 10, No. 6. P. 6410–6417. DOI: https://doi.org/10.48084/etasr.3832

3. Kheiri A., Ozcan E., Parkes A. J. A hybrid meta-heuristic for the generation of feasible large-scale course timetables using instance decomposition. arXiv preprint. 2023. arXiv:2310.20334. 25 p. URL: https://arxiv.org/pdf/2310.20334.pdf (дата звернення: 07.10.2025).

4. Next.js Documentation. Vercel Inc., 2025. URL: https://nextjs.org/docs (дата звернення: 16.10.2025).

5. Prisma Documentation. Prisma Data, Inc., 2025. URL: https://www.prisma.io/docs (дата звернення: 16.10.2025).

6. PostgreSQL Documentation. The PostgreSQL Global Development Group, 2025. URL: https://www.postgresql.org/docs (дата звернення: 03.11.2025).

7. Web Vitals: Essential metrics for a healthy site. Google LLC, 2025. URL: https://web.dev/vitals (дата звернення: 03.11.2025).

8. Apache JMeter Users Manual. The Apache Software Foundation, 2024. URL: https://jmeter.apache.org/usermanual/index.html (дата звернення: 03.11.2025).

9. OWASP Top Ten Web Application Security Risks. OWASP Foundation, 2021. URL: https://owasp.org/www-project-top-ten (дата звернення: 07.11.2025).

10. TypeScript Documentation. Microsoft Corporation, 2025. URL: https://www.typescriptlang.org/docs (дата звернення: 07.11.2025).

СЕКЦІЯ «МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ»

УДК 004.85:004.932
Крупський О.В., Приходько О.С., Вавринюк К.В.
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк
email: o.prykhodko@lntu.edu.ua

РОЗРОБКА ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ АНОТОВАНИХ ДАТАСЕТІВ ДЛЯ НАВЧАННЯ AI-АГЕНТІВ

Розробка автономних інтелектуальних агентів, здатних навчатися у складних середовищах, є однією з ключових задач сучасного штучного інтелекту. Особливу складність становлять середовища, що не мають програмного інтерфейсу (API), наприклад, мобільні відеоігри, де агент має сприймати світ виключно через візуальний потік даних. Фундаментальною перешкодою на цьому шляху є етап збору та анотації великих обсягів даних для навчання моделей комп'ютерного зору. Існуючі методи є або надто повільними (ручна розмітка), або недостатньо надійними (повністю автоматичні алгоритми). У даній роботі запропоновано вирішення цієї проблеми через розробку програмного інструменту для напівавтоматичної анотації ігрових об'єктів. Інструмент, реалізований на Python, інтегрується з емулятором Android через ADB для захоплення зображень та надає користувачу інтерактивний інтерфейс для швидкого створення міток у вигляді бінарних матриць. В результаті апробації інструменту на грі "Block Blast!" було успішно згенеровано датасет з 503 зображень, що представляють 40 унікальних класів фігур. Розроблений підхід значно прискорює процес підготовки даних, створюючи основу для подальшого навчання згорткової нейронної мережі та розробки AI-агента на базі навчання з підкріпленням.

Ключові слова: штучний інтелект, навчання з підкріпленням, комп'ютерний зір, збір даних, анотація зображень, генерація датасету, Python, OpenCV, Tkinter, ігровий AI-агент.

Krupskyi O.V., Prykhodko O.S., Vavryniuk K.V. Development of a Tool for Generating Annotated Datasets for Training AI Agents. The development of autonomous intelligent agents capable of learning in complex environments is a key challenge in modern artificial intelligence. Environments lacking a programmatic Application Programming Interface (API), such as mobile video games, present a particular challenge, as they require the agent to perceive the game state solely through a visual data stream. A fundamental bottleneck in this process is the collection and annotation of large-scale datasets required to train computer vision models. Existing methods are often either too slow (manual annotation) or insufficiently reliable (fully automated algorithms). This paper proposes a solution to this problem by developing a software tool for the semi-automatic annotation of in-game objects. The tool, implemented in Python, integrates with an Android emulator via ADB to capture images and provides an interactive user interface for the rapid creation of labels in the form of binary matrices. By applying the tool to the game "Block Blast!", a dataset of 503 images representing 40 unique shape classes was successfully generated. The proposed approach significantly accelerates the data preparation pipeline, creating a foundation for the subsequent training of a convolutional neural network and the development of a reinforcement learning-based AI agent.

Keywords: Artificial Intelligence, Reinforcement Learning, Computer Vision, Data Collection, Image Annotation, Dataset Generation, Python, OpenCV, Tkinter, Game-playing AI agent

Вступ. Сьогодні одним із ключових напрямів розвитку штучного інтелекту є створення автономних агентів, здатних самостійно вивчати складні середовища й приймати рішення. Навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL) – один із найпотужніших підходів до цього, як вперше систематизовано в класичній праці Саттона та Барто [1]. В якості тестового полігону для RL-агентів традиційно використовуються відеоігри, з їх чіткими правилами, вимірюваними метриками та структурованим середовищем [2].

Однак багато мобільних ігрових середовищ, особливо тих, які не позиціонуються як симулятори, не забезпечують API для прямого доступу агента до станів або дій. У таких умовах агент має “бачити” світ гри так, ніби він – людина: через пікселі, як із екрана, і приймати рішення на основі візуальної інформації. Це ставить перед дослідниками складну задачу – побудувати

надійний модуль комп’ютерного зору, який може інтерпретувати екранні дані та виділяти об'єкти й стани гри.

Актуальність та постановка проблеми. Ключовою передумовою для створення будь-якої дієвої моделі комп'ютерного зору є наявність великого та якісно анотованого набору даних (датасету). Процес створення такого датасету є головним "вузьким місцем", що стримує швидкість розробки. Таким чином, актуальність роботи полягає у вирішенні проблеми підвищення ефективності існуючих підходів до збору даних для навчання AI-агентів. **Проблема**, що вирішується в даній роботі, полягає у створенні ефективного процесу збору та анотації зображень ігрових об’єктів із візуального потоку гри без API, з подальшим представленням даних у форматі, придатному для навчання моделей машинного навчання.

Огляд існуючих методів. Для вирішення задачі анотації даних можна виділити три основні підходи:

1. Ручна анотація – класичні інструменти, такі як LabelImg або CVAT (Computer Vision Annotation Tool) [3], використовуються для ручного виділення об’єктів. Цей підхід забезпечує високу точність, але дуже трудомісткий і повільний, що робить його непридатним для масштабних датасетів.

2. Автоматична анотація. Для цього часто застосовуються класичні підходи з комп’ютерного зору, такі як сегментація за кольором або пошук контурів. Проте в динамічних ігрових сценах вони часто дають низьку надійність через варіації в освітленні, фоні або ефектах. Дослідники також звертаються до синтетичних даних: наприклад, у роботі [4] створюють сегментовані версії ігрових кадрів, щоб спростити вхідне представлення для агентів RL і підвищити продуктивність моделі. Також у роботі [5] пропонується метод автоматичної генерації сегментаційних датасетів для відеоігор, що значно знижує витрати на ручну розмітку й покращує якість моделей. Також можна відзначити розробку RL-агентів для гри в Тетріс, де автори також стикалися з необхідністю перетворення візуальної інформації на структурований стан гри [6].

3. Напівавтоматичний підхід. Такі методи поєднують автоматичне оброблення даних із людською перевіркою або корекцією. Наприклад, у роботі [7] запропоновано ARS-підхід: використання доповненої реальності для швидкого створення анотованих датасетів з мінімальним людським втручанням. Цей підхід знижує витрати на розмітку та підвищує продуктивність детекторів.

Крім того, у методах навчання з підкріпленням, які працюють безпосередньо з піксельними зображеннями (RL-from-pixels), широко застосовується регуляризація шляхом аугментації даних. Наприклад, в роботі [8] показано, що прості методи аугментації (crop, jitter тощо) можуть зробити навчання агентів на пікселях стабільнішим і продуктивнішим. Інший підхід – контрастивне навчання, як у методі CURL (Contrastive Unsupervised Representations for Reinforcement Learning), де агент навчається витягати представлення з пікселів за допомогою контрастивної втрати, що значно підвищує ефективність RL [9].

Методологія дослідження.

Для вирішення поставленої проблеми було розроблено програмний інструмент на мові Python з використанням бібліотек Tkinter, OpenCV [10], NumPy [11] та взаємодією з утилітою ADB [12]. Алгоритм роботи інструменту складається з наступних етапів.

1. Захоплення зображення. За допомогою команди hd-adb exec-out screencap [12] відбувається захоплення поточного екрану емулятора BlueStacks. Із повного скріншоту автоматично вирізається область, де з'являються нові фігури, на основі заздалегідь визначених координат.

2. Інтерактивна анотація. Зображення трьох фігур відображаються у графічному інтерфейсі. Для кожної фігури передбачено інтерактивну сітку розміром 5x5 (розмір обрано відповідно до максимальних габаритів фігур у грі "Block Blast!"). Користувач кліками миші відтворює форму фігури на сітці.

3. Формування та оптимізація мітки. Інформація з сітки перетворюється на бінарну матрицю NumPy розміром 5x5. Після цього застосовується ключова оптимізація: спеціальна функція обрізає нульові рядки та стовпці по краях матриці. Це дозволяє отримати канонічне, мінімально можливе матричне представлення фігури, незалежне від її положення у сітці.

4. Збереження даних. Кожен анотований об'єкт зберігається у вигляді пари файлів: оригінальне графічне зображення (.png) та його оптимізоване матричне представлення (.npy).

Результати та їх обговорення. Апробація розробленого інструменту проводилася на мобільній грі-головоломці "Block Blast!". В результаті його застосування було успішно згенеровано та анотовано датасет, що містить 503 зображення. Цей датасет репрезентує 40 унікальних типів

фігур, що використовуються у грі. Практичне використання інструменту показало його високу ефективність. Середній час, необхідний для захоплення екрану, анотації трьох фігур та збереження результату, склав 5-10 секунд. Це в рази швидше за альтернативні ручні методи. Створений датасет є повністю готовим для наступного етапу – навчання згорткової нейронної мережі для задачі класифікації зображень фігур. Оптимізований формат міток у вигляді матриць мінімального розміру спрощує подальшу обробку даних та уніфікує представлення фігур різної форми та розміру.

Висновки. У ході виконання роботи було розроблено та апробовано програмний інструмент для напівавтоматичної анотації ігрових об'єктів. Розроблений засіб вирішує актуальну проблему "вузького місця" у процесі підготовки даних для навчання AI-агентів, що працюють у візуальних середовищах без API. Основний науково-практичний внесок роботи полягає у самій методології, що поєднує автоматизацію захоплення зображень з швидкою інтерактивною розміткою, та в реалізації алгоритму оптимізації міток до канонічного вигляду.

Перспективою подальшої роботи є використання отриманих результатів для поетапної розробки повноцінного ігрового AI-агента, що включатиме:

- навчання згорткової нейронної мережі на згенерованому датасеті для класифікації ігрових об'єктів;
- побудову комплексного модуля візуального сприйняття на основі навченої моделі;
- створення та навчання агента на базі алгоритмів навчання з підкріпленням, здатного приймати рішення на основі візуальної інформації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Sutton R. S., Barto A. G. *Reinforcement Learning: An Introduction.* 2nd ed. URL: http://incompleteideas.net/book/the-book-2nd.html (date of access: 10.11.2025)

2. Justesen N., Bontrager P., Togelius J., Risi S. Deep Learning for Video Game Playing – arXiv:1708.07902 v3, 2019. – URL: https://arxiv.org/abs/1708.07902

3. Computer Vision Annotation Tool (CVAT). Zenodo record. DOI: 10.5281/zenodo.8070041. URL: https://zenodo.org/records/8070041

4. Montalvo, J., García-Martín, Á. & Bescós, J. Exploiting semantic segmentation to boost reinforcement learning in video game environments. *Multimed Tools Appl* **82**, 10961–10979 (2023). https://doi.org/10.1007/s11042-022-13695-1

5. LeBlanc, D. and Lee, G. Automatically Generating Image Segmentation Datasets for Video Games. In Proceedings of the 15th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2023) - Volume 3, pages 509-516 DOI: 10.5220/0011693800003393

6. Park K.W., Kim J.S. *Tetris Bot using Deep Reinforcement Learning.* Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. 2022; Vol. 28, No. 12, pp. 1155-1160. DOI: 10.5302/J.ICROS.2022.22.0140

7. De Gregorio D., Tonioni A., Palli G., Di Stefano L. Semi-Automatic Labeling for Deep Learning in Robotics. arXiv preprint arXiv:1908.01862, 2019. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.01862

8. Kostrikov I., Yarats D., Fergus R. Image Augmentation Is All You Need: Regularizing Deep Reinforcement Learning from Pixels. arXiv preprint arXiv:2004.13649, 2020. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.13649

9. Srinivas A., Laskin M., Abbeel P. CURL: Contrastive Unsupervised Representations for Reinforcement Learning. arXiv preprint arXiv:2004.04136, 2020. URL: https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.04136

10. OpenCV Documentation. URL: https://docs.opencv.org/ (date of access: 10.11.2025).

11. NumPy Documentation. URL: https://numpy.org/doc/ (date of access: 10.11.2025).

12. Android Developers. Android Debug Bridge (ADB). URL: https://developer.android.com/tools/adb (date of access: 10.11.2025).

УДК 621.313
Лишук В., Крутій П., Антонюк В.
Луцький національний технічний університет
v.lyshuk@lntu.edu.ua

НАЙПРОСТІША МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОДНОФАЗНОГО ВИПРОСТУВАЧА

У статті запропоновано математичну модель однофазного мостового випрямляча, рівняння якого записані у вигляді комутаційних функцій. Показано, що така модель є найбільш ефективною для аналізу різноманітних режимів роботи. Розв'язок комутаційних функцій реалізується із застосуванням сучасних методів з допомогою комп'ютерної техніки.
Ключові слова: математична модель, однофазний випрямляч, комутаційні функції.

Lyshuk V., Krutiy P., Antoniuk V. The simplest mathematical model of a single-phase rectifier. The article proposes a mathematical model of a single-phase bridge rectifier, the equations of which are written in the form of switching functions. It is shown that such a model is the most effective for the analysis of various operating modes. The solution of switching functions is implemented using modern methods with the help of computer technology.
Keywords: mathematical model, single-phase rectifier, switching functions.

Постановка проблеми. Некеровані випрямлячі відносяться до перетворювачів електричної енергії змінного струму в електричну енергію постійного струму. В даний час вони виконуються в основному на силових напівпровідникових вентилях і знаходять широке застосування в якості вторинного джерела живлення**.**

На сьогодні задача випрямлення синусоїдного струму дуже часто зустрічається на практиці, зокрема в електротехніці, електроніці, телекомунікаціях, зокрема при створенні резервних джерел живлення, бо значна частина електроприймачів за своїм принципом роботи вимагає постійного струму. Важливим завданням при побудові моделі є врахування показників якості (пульсації, коливання) вихідних параметрів, зокрема струмів та напруг [3].

Математичне моделювання є потужним інструментом при дослідженні та аналізі електротехнічних та електронних пристроїв. Рівняння, які є основою побудови таких моделей, розв'язуються відповідними числовими методами з допомогою персональних комп'ютерів. У роботі ми скористаємось простішою методикою, а саме комутаційними функціями.

Основна частина. Розглянемо особливості математичного моделювання найпростішого однофазного мостового випрямляча. Силове коло однофазного випрямляча, що працює на навантаження $R_н$ приведено на рисунку 1. Змінна напруга u з вторинної обмотки трансформатора надходить у діагональ мостового однофазного випрямляча, представленого у вигляді чотирьох ідеальних ключів, побудованих на діодах VD1…VD4.

З появою позитивної півхвилі напруги u за рахунок природної комутації відкриті ключі VD2…VD4. Струм у цьому випадку протікає від вузла через ключ VD4 – навантаження (L, $R_Н$) – ключ VD2 – на другу клему x вторинної обмотки трансформатора. З появою негативної півхвилі напруги u на виході трансформатора відкриваються ключі VD1 та VD3. Напрямок струму i_d при цьому не змінюється.

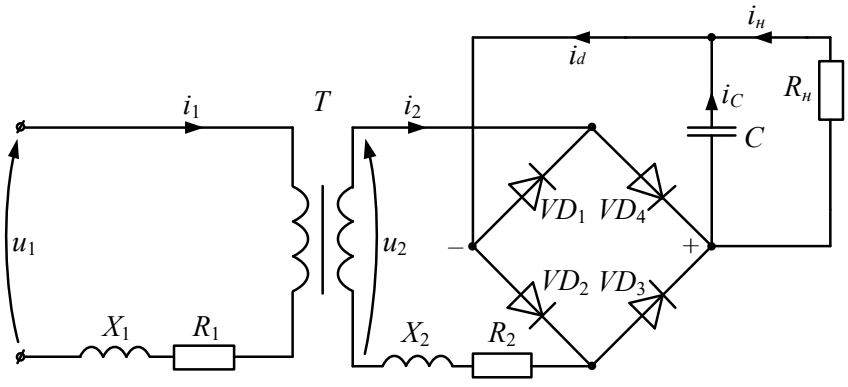


Рисунок 1 – Електрична схема випрямляча

Діоди змоделюємо ідеальними ключами [2], що змінюватиме структуру електричного кола. При цьому для кожної окремої комбінації відкритих і закритих діодів необхідно записати свою систему алгебричних рівнянь. Це дещо створює складності при аналізі роботи таких пристроїв, але завжди можна звести множину систем таких рівнянь до однієї системи, вівши додаткові логічні змінні.

При природній комутації вентилів умовою для відкриття ідеального ключового елементу (ІКЕ) є сигнальні функції, значення яких визначаються фазою напруги вторинної обмотки трансформатора Так, для ідеальних ключових елементів VD1 та VD3 комутаційну функцію можна записати у вигляді:

$$f_1(\theta) = 0{,}5\,\mathrm{sign}(\sin(\theta)+1), \quad (1)$$

а для ІКЕ VD2 та VD4:

$$f_2(\theta) = 0{,}5\,\mathrm{sign}(\sin(\theta)-1). \quad (2)$$

Напруга на вторинній обмотці трансформатора описується рівнянням

$$u_2(t) = U_m\cos(\omega t), \quad (3)$$

де $\omega = 2\pi f$, f - частота первинної мережі, $\theta = \omega t$.

Значення напруги $U_d = U_c$ можна у вигляді

$$U_d = (f1(\theta) + f_2(\theta))\, u_2(t). \quad (4)$$

Струм i_d визначається значенням струму, що протікає по вторинній обмотці трансформатора і параметрами паралельно ввімкнених резистора R елементів та ємності С. Струм, що протікає по ємнісному елементу, випереджає прикладену до нього напругу за фазою на кут $\pi/2$. Для інтервалу часу, протягом якого заряджається ємність, значення струму вторинної обмотки трансформатора можна представити як

$$I_н = i_d + i_c, \quad (5)$$

де $i_c = \omega C U_d \cos(\omega t+\pi/2-\varphi)\cdot f_3(\theta_1)$, а $i_d = (U_m/R)\cdot[\cos(\omega t+\varphi)\cdot(f_3(\theta_1)+f_4(\theta_1))]$.

Значення комутаційних функцій для струмів $f_3(\theta_1)$ і $f_4(\theta_1)$ даного інтервалу часу, з урахуванням впливу параметрів схеми, можна записати у вигляді:

$$f_3(\theta_1) = 0{,}5\cdot(\mathrm{sign}(\sin(\omega t+\varphi)+1); \qquad f_4(\theta 1) = 0{,}5\cdot(\mathrm{sign}(\sin(\omega t+\varphi)-1)). \quad (6)$$

Значення постійної складової i_0 струму i_d визначають як

$$i_0 = \alpha_0\cdot U_m/R, \quad (7)$$

де α_0 – коефіцієнт постійної складової ряду Фур'є можна подати у вигляді співвідношення (8):

$$\alpha_0 = (\sin\varphi + \varphi\cos\varphi)/[\pi(1-\cos\varphi)]. \quad (8)$$

Таким чином, алгоритм програми для моделювання некерованого випрямляча можна подати у вигляді схеми, зображеної на рисунку 2.

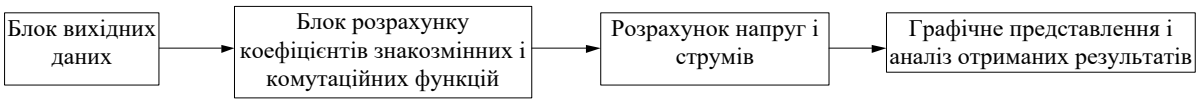


Рисунок 2 – Алгоритм програми

При математичному моделюванні, як електричних перетворювачів користуються системою відносних одиниць [1, 2]. Тому вихідні дані в блоку вихідних даних записують у відносних одиницях. Вихідними даними для математичної моделі некерованого випростувача в цьому випадку

є значення частоти обертання узагальненого вектора напруги живлення ω у відносних одиницях дорівнює 1, значення ємності і опору навантаження $R_н$.

Приклад математичної моделі однофазного мостового випростувача, реалізованої у програмі MATHCAD наводиться нижче.

Вихідні дані: ω =1, C:=1.5, R:=1.5; i(t):=sin(t); u(t):=10sin(t).

1. Визначення комутаційних функцій для відкриття ІКЕ

$f_1(t) = 0{,}5\text{sign}(i(t)+1)$, $f_2(t) = 0{,}5\text{sign}(i(t)-1)$

t:=0, 0.01…1000

На рисунку 3 показано графіки комутаційних функцій.

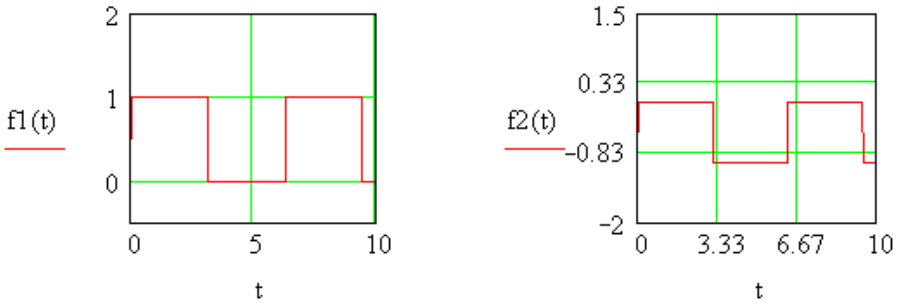


Рисунок 3 – Графіки комутаційних функцій

$$U_d(t):= [f_1(t)+f_2(t)]\cdot u_2(t),$$

де $f_1(t)$ та $f_2(t)$ – комутаційні функції, що визначають відповідно стан діодів VD1, VD3 і VD2, VD4, а $U_d(t)$ - напруга на виході випростувача.

Комутаційні функції $f_3(t)$ та $f_4(t)$ визначають реакцію навантаження та її вплив на струми i_d та i_c. У даному прикладі не розрахована і не представлена часова залежність напруги $U_c(t)$ на ємності С. На рисунку 4 представлені часові залежності струмів і напруги $U_d(t)$, отримані з допомогою розглядуваної в якості прикладу моделі.

U_m:=10.0; φ:=atan(ωCR); φ:=1.153; $i_1(t)$:= sin(t-φ); $f_3(t)$:= 0,5sign($i_1(t)$+1); $f_4(t)$:= 0,5sign($i_1(t)$-1);

i_c:=ωCU_dcos(ωt+ π/2-φ)·$f_3(t)$; α_0:=0.239; i_0:=1.59; $i_d(t)$:=(10/R)·sin(ωt-φ)·($f_3(t)$+$f_4(t)$));

$i_н(t)$:= $i_d(t)$+ i_0+ $i_c(t)$

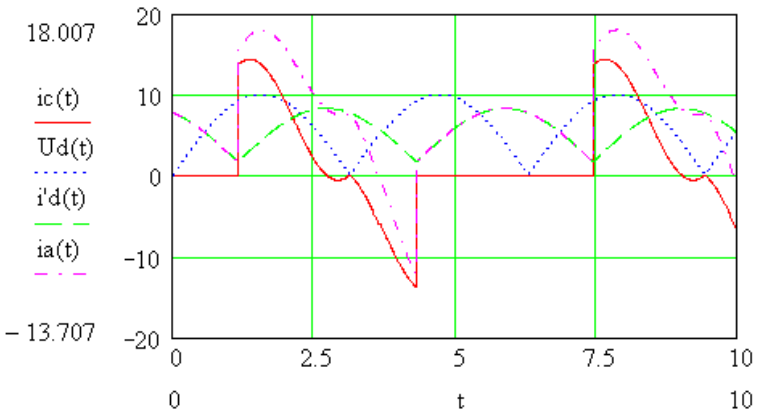


Рисунок 4 – Залежності струмів і напруги $U_d(t)$

Висновки. Аналіз залежності струму $i_н(t)$ дозволяє зробити висновок, що некерований випрямляч є нелінійним приймачем електричної енергії, що споживає значну реактивну потужність. При моделюванні випрямляча було використано систему відносних одиниць електричних величин, що значно спрощує аналіз.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бондаренко І. М. Моделювання в електроніці. Національний університет радіоелектроніки. Харків : ХНУРЕ, 2020, 163 с.

2. Денисюк С. П., Дерев'янко Д. Г., Бєлоха Г. С. Силова електроніка в системах електропостачання. Навчальний посібник. Електронне мережне навчальне видання. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського 2022, 130 с.

3. Чабан В. Математичне моделювання електромеханічних процесів. Львів : Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 1997, 342 с.

УДК 620.9

Міщенко Д.О.
НТУ «ХПІ», аспірант кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем» Харків, Україна
Denys.Mishchenko@sgt.khpi.edu.ua
denismishchenko11@gmail.com

ОЦІНКА СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИХ ПЕРЕВАГ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НА БАЗІ DC-МІКРОМЕРЕЖ У СІЛЬСЬКИХ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТАХ З АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

У статті досліджено проблематику енергозабезпечення сільських населених пунктів України в умовах кризового стану централізованої енергосистеми та зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Проведено комплексний порівняльний аналіз ефективності використання традиційних розподільчих мереж змінного струму (AC) та низьковольтних мікромереж постійного струму (DC) при інтеграції сонячних електростанцій та систем накопичення. Доведено, що перехід на DC-архітектуру дозволяє усунути етапи подвійного перетворення струму, що підвищує загальний ККД системи на 10–15% та знижує нормовану вартість електроенергії (LCOE). Обґрунтовано соціально-економічні переваги впровадження DC-мікромереж, серед яких: зниження операційних витрат домогосподарств, підвищення надійності живлення критичної інфраструктури в автономному («острівному») режимі та створення технічних умов для розвитку локального ринку енергії (P2P-торгівлі). Визначено, що DC-мікромережі є оптимальним рішенням для забезпечення сталості та енергонезалежності малих громад.

Ключові слова: DC-мікромережі, низьковольтні мережі постійного струму (LVDC), альтернативні джерела енергії, енергоефективність, сільські населені пункти, соціально-економічний ефект, LCOE, енергетична безпека, прозюмер.

Mishchenko D. O. Assessment of the social -economic advantages of implementing DC-based microgrid management systems in rural settlements with alternative energy sources. The article examines the challenges of power supply in rural settlements of Ukraine amidst the crisis state of the centralized energy system and the increasing share of renewable energy sources (RES). A comprehensive comparative analysis was conducted regarding the efficiency of using traditional alternating current (AC) distribution networks versus low-voltage direct current (DC) microgrids when integrating solar power plants and energy storage systems. It is proven that the transition to a DC architecture allows for the elimination of double current conversion stages, increasing overall system efficiency by 10–15% and reducing the Levelized Cost of Energy (LCOE). The socio-economic benefits of implementing DC microgrids are substantiated, including: reduced operational costs for households, increased power supply reliability for critical infrastructure in autonomous ("island") mode, and the creation of technical conditions for the development of a local energy market (P2P trading). It is determined that DC microgrids are the optimal solution for ensuring the sustainability and energy independence of small communities.

Keywords: DC microgrids, low-voltage direct current (LVDC) networks, alternative energy sources, energy efficiency, rural settlements, socio-economic effect, LCOE, energy security, prosumer.

Постановка проблеми. Сучасний стан енергетичної системи України характеризується безпрецедентними викликами, зумовленими як глобальними тенденціями, так і внутрішніми кризовими факторами. З одного боку, курс на євроінтеграцію та «Green Deal» вимагає декарбонізації та децентралізації генерації. З іншого боку, в умовах воєнних дій та цілеспрямованого руйнування централізованої енергетичної інфраструктури, забезпечення життєдіяльності малих населених пунктів стає питанням національної безпеки. Сільські громади є найбільш вразливою категорією споживачів: значна протяжність ліній електропередач, їх фізична зношеність та високий опір призводять до падіння напруги, частих аварійних відключень та значних

технологічних втрат при транспортуванні. Традиційним шляхом вирішення цієї проблеми є інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема розподілених сонячних електростанцій (СЕС). Однак, масове підключення сучасних DC-орієнтованих джерел (сонячні панелі, акумулятори) до архітектурно застарілих мереж змінного струму (AC) створює низку технічних протиріч, що знижує економічну ефективність модернізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика мікромереж (Microgrids) широко висвітлюється у світовій науковій літературі. Дослідження вчених, зосереджені на силовій електроніці та керуванні перетворювачами. Вітчизняні науковці (Кириленко О.В., Денисюк С.П.) розглядають питання інтеграції ВДЕ в ОЕС України. Проте, у більшості робіт домінує технократичний підхід. Недостатньо дослідженим залишається комплексний вплив зміни роду струму (з AC на DC) на соціально-економічні показники конкретного домогосподарства та громади в цілому, особливо в контексті формування тарифів та енергетичної бідності.

Тема корелює з пріоритетами Енергетичної стратегії України до 2035 року в частині підвищення енергоефективності та розвитку "розумних мереж" (Smart Grids). Практична цінність полягає у розробці моделі енергозабезпечення, яка мінімізує залежність громад від зовнішніх факторів.

Основна частина.

1. Технологічні бар'єри традиційних мереж як фактор економічних втрат Для коректної оцінки економічних переваг необхідно проаналізувати фізичну природу втрат у сучасних системах електропостачання. Сучасне домогосподарство кардинально змінило структуру споживання за останні 20 років. Освітлення перейшло на LED-технології (DC), побутова техніка все частіше використовує інверторні двигуни (з проміжною ланкою DC), комп'ютерна та мультимедійна техніка живиться постійним струмом. Генерація (сонячні панелі) та системи накопичення (Li-ion, LiFePO4 акумулятори) також є джерелами постійного струму.

У традиційній схемі AC-мікромережі відбувається багаторазове перетворення енергії:

DC (фотоелектричний модуль) → AC (мережевий інвертор).

AC (мережа) → DC (зарядний пристрій акумулятора).

DC (акумулятор) → AC (автономний інвертор при розряді).

AC (розетка) → DC (блок живлення споживача).

Кожен етап силового перетворення характеризується ККД на рівні 92-96%. При послідовному з’єднанні ланок загальна ефективність системи може падати до 80-85%. Для кінцевого споживача це означає, що 15-20% згенерованої "зеленої" енергії втрачається на нагрів перетворювачів, не приносячи користі. Перехід на топологію DC-мікромережі (Low Voltage DC) дозволяє виключити інвертори та випрямлячі з ланцюга, передаючи енергію безпосередньо або через високоефективні DC/DC-перетворювачі (ККД >98%).

2. Економічний аналіз: CapEx та OpEx Економічна доцільність впровадження DC-мікромереж оцінюється через структуру капітальних (CapEx) та операційних (OpEx) витрат.

Аналіз капітальних витрат (CapEx). Існує міф, що DC-обладнання є значно дорожчим. Однак, при комплексному проектуванні "з нуля" для нового району чи реконструкції селища, DC-архітектура дозволяє заощадити на:

Кабельно-провідниковій продукції: Відсутність скін-ефекту та реактивних струмів у мережах постійного струму дозволяє використовувати провідники меншого перерізу для передачі тієї ж активної потужності.

Силовій електроніці: Гібридні AC-інвертори є складними та дорогими пристроями. DC/DC контролери заряду є конструктивно простішими, містять менше компонентів і, відповідно, є дешевшими у виробництві.

Аналіз операційних витрат (OpEx) та LCOE. Найвагоміший внесок у соціально-економічний ефект дає зниження операційних витрат. Показник нормованої вартості електроенергії (LCOE) для DC-мікромереж є нижчим через:

Зниження втрат: Збережені 10-15% енергії еквівалентні безкоштовній генерації, що зменшує термін окупності системи.

Надійність обладнання: Електролітичні конденсатори в AC-інверторах є "слабкою ланкою", що часто виходить з ладу через 5-7 років. DC-системи є більш надійними, що зменшує витрати домогосподарств на ремонт.

3. Соціальний вимір: енергетична безпека та якість життя Соціальні переваги не обмежуються фінансовою економією. Вони формують нову якість життя у сільській місцевості.

Стійкість критичної інфраструктури. В умовах нестабільності зовнішньої мережі, здатність селища до "острівного режиму" (island mode) є критичною. DC-мікромережа дозволяє об'єднати ресурси (акумулятори домогосподарств, генерацію на дахах школи чи амбулаторії) в єдину балансуючу систему. Це гарантує роботу насосів водопостачання, зв'язку та опалення навіть при тривалих блекаутах, запобігаючи гуманітарним кризам локального масштабу.

Трансформація споживача у "прозюмера". Впровадження DC-мікромереж сприяє розвитку концепції "прозюмера" (prosumer = producer + consumer). Завдяки спрощеному керуванню потоками потужності в колах постійного струму, стає технічно простіше реалізувати P2P (peer-to-peer) торгівлю енергією. Це створює внутрішній ринок громади: домогосподарство з надлишком енергії може продавати її сусідам за тарифом, нижчим від мережевого, але вищим від "зеленого тарифу", що вигідно обом сторонам. Такий підхід стимулює соціальну згуртованість та економічну активність всередині селища.

Екологічний аспект та здоров'я. Заміна дизель-генераторів, які масово використовуються як резерв у АС-мережах, на безшумні та екологічні системи накопичення в DC-мережах позитивно впливає на екологічну обстановку в щільній забудові, зменшуючи шумове забруднення та викиди шкідливих речовин.

Висновки. Проведене дослідження дозволяє стверджувати, що перехід на використання DC-мікромереж у малих населених пунктах є не лише технічно обґрунтованим, але й соціально необхідним кроком.

Доведено, що усунення ланок подвійного перетворення енергії дозволяє підвищити загальну енергоефективність системи на 10-15%, що прямо конвертується у зниження комунальних витрат для населення.

Економічний аналіз демонструє переваги DC-архітектури в довгостроковій перспективі за рахунок зниження OpEx та подовження терміну служби обладнання.

Соціальний ефект проявляється у підвищенні резильєнтності громад до зовнішніх загроз, забезпеченні безперебійної роботи критичної інфраструктури та створенні умов для розвитку локальної енергетичної економіки.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку стандартизованих типових рішень для DC-мікромереж різної потужності для прискорення їх впровадження в Україні.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Міщенко Д. О. Забезпечення надійності електропостачання містечка за рахунок резервного живлення від альтернативних джерел енергії [Електронний ресурс] / Д. О. Міщенко // Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених : зб. тез доп. 18-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, 19-22 листопада 2024 р. / гол. Є. І. Сокол ; оргком.: Р. П. Мигущенко [та ін.] ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Електрон. текст. дані. – Харків : НТУ "ХПІ", 2024. – С. 291 URI: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/85935

2. S. Denysiuk, H. Bielokha, D. Derevianko and B. Vadym, "Design and modeling PV converter with hysteresis control," 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 165-168, doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969345.

3. Своя енергія. Резервне електропостачання квартир, будинків, комерційних та інфраструктурних об’єктів. [електронний ресурс]. – режим доступу: https://svoya-energy.com.ua/rezervne-elektropostachannya-kvartir-budinkiv-komertsijnih-ta-infrastrukturnih-ob-yektiv/

УДК 620.9

Нечипорук Р.О.
НТУ «ХПІ», аспірант кафедри «Автоматизація та кібербезпека енергосистем» Харків, Україна
ruslan.nechyporuk@ieee.khpi.edu.ua

СИСТЕМА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ БАГАТОСЕНСОРНИХ ДАНИХ ТА ГІБРИДНИХ МОДЕЛЕЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Стаття присвячена розробці архітектури Системи інтелектуальної діагностики (СІД) для переходу ЕЕМ до прогностичного обслуговування (PdM). Мета — ефективне злиття багатосенсорних даних та використання гібридного ШІ для точної діагностики обладнання. Обґрунтовано застосування гібридної нейронної мережі CNN-LSTM, яка поєднує вилучення просторових ознак та аналіз часових залежностей. Експериментально доведено, що CNN-LSTM забезпечує точність класифікації 94,8%, що значно перевершує чисті моделі. Впровадження методів Explainable AI (XAI) підвищує прозорість рішень. Результати підтверджують ефективність гібридного підходу для підвищення надійності ЕЕМ.

Ключові слова: штучний інтелект; багатосенсорні дані; гібридна модель; CNN-LSTM; прогностичне обслуговування; діагностика обладнання; електроенергетичні мережі; інтерпретованість рішень.

Nechyporuk R. O. Intelligent diagnostic system for power equipment based on multi-sensor data and hybrid artificial intelligence models. The paper is dedicated to developing the architecture of an Intelligent Diagnostic System (IDS) to facilitate the transition of Electric Power Systems (EPS) towards Predictive Maintenance (PdM). The goal is the efficient multi-sensor data fusion and the utilization of hybrid AI for accurate equipment diagnostics. The application of a hybrid CNN-LSTM neural network is substantiated, combining spatial feature extraction and time dependency analysis. It is experimentally proven that CNN-LSTM provides a classification accuracy of 94.8%, significantly outperforming pure models. The implementation of Explainable AI (XAI) methods enhances decision transparency. The results confirm the effectiveness of the hybrid approach in improving EPS reliability.

Keywords: artificial intelligence; multi-sensor data; hybrid model; CNN-LSTM; predictive maintenance; equipment diagnostics; electric power systems; interpretability of decisions.

Постановка проблеми. Сучасні електроенергетичні мережі (ЕЕМ) характеризуються високою складністю, розподіленістю та динамічністю, що вимагає переходу від планово-попереджувального ремонту до прогностичного обслуговування (Predictive Maintenance, PdM). Надійність та безперервність енергопостачання критично залежать від своєчасної та точної діагностики стану ключового обладнання (трансформатори, вимикачі, лінії). Існуючі методи моніторингу, засновані на порогових значеннях або однотипних вимірах, часто виявляються недостатніми для виявлення прихованих або комплексних дефектів на ранніх стадіях. Проблема полягає у необхідності ефективної інтеграції великих обсягів різнорідних (багатосенсорних) даних моніторингу та розробки інтелектуальних алгоритмів, здатних інтерпретувати ці дані та точно прогнозувати залишковий ресурс обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальні дослідження активно використовують методи машинного навчання (ML) та глибокого навчання (DL) для аналізу часових рядів даних моніторингу. Зокрема, згорткові нейронні мережі (CNN) успішно застосовуються для виявлення просторово-часових закономірностей у вібраційних та акустичних сигналах, а рекурентні нейронні мережі (RNN) та їх варіанти, такі як LSTM, демонструють високу ефективність у прогнозуванні на основі послідовних даних (температура, часткові розряди). Однак, більшість робіт зосереджена на одному типі даних або використовує "чорний ящик" моделі. Недостатньо дослідженою є проблема ефективного злиття (fusion) різнорідних даних (наприклад, вібрація + електричні параметри + хімічний аналіз) та застосування гібридних моделей, що поєднують переваги різних архітектур ШІ.

Дане дослідження безпосередньо пов'язане із завданням цифрової трансформації енергетичного сектору та підвищенням кіберстійкості критичної інфраструктури. На практиці впровадження інтелектуальної діагностики дозволить енергетичним компаніям скоротити операційні витрати на обслуговування, зменшити кількість аварійних відключень та подовжити термін служби дороговартісного обладнання, що має важливе економічне та соціальне значення.

Основною метою статті є розробка та обґрунтування архітектури Системи інтелектуальної діагностики (СІД), здатної:

1. Здійснювати ефективне злиття багатосенсорних даних моніторингу ЕЕМ-обладнання.
2. Використовувати гібридну модель штучного інтелекту для точної класифікації стану та прогнозування дефектів.
3. Забезпечити інтерпретованість діагностичних рішень.

Архітектура Системи Інтелектуальної Діагностики (СІД)

СІД пропонується як трирівнева архітектура:

1. Рівень збору даних (Edge/Fog): Прилади моніторингу (PMU, датчики температури, вібрації, часткових розрядів) збирають дані. Первинна фільтрація та агрегація даних відбувається на рівні периферії.
2. Рівень злиття даних (Data Fusion): Отримані часові ряди (наприклад, електричні показники, вібраційний спектр, показники хімічного аналізу масла) синхронізуються та перетворюються у єдиний вектор ознак. Використовується метод злиття на рівні ознак (Feature-Level Fusion).
3. Рівень інтелектуального аналізу (Core AI): На цьому рівні застосовується гібридна модель ШІ для діагностики.

Для аналізу багатосенсорних даних пропонується використовувати Гібридну нейронну мережу (CNN-LSTM):

- CNN-модуль (Згорткова мережа): Застосовується для вилучення локальних просторових ознак з окремих сенсорних даних (наприклад, виявлення специфічних гармонік у електричному сигналі або піків у вібраційному спектрі). CNN ефективно працює з масивами даних, виділяючи найбільш значущі інваріантні ознаки.
- LSTM-модуль (Довга короткочасна пам'ять): Застосовується після CNN-модуля для аналізу часових залежностей та довгострокової пам'яті. Вектор ознак, отриманий від CNN, подається на вхід LSTM, що дозволяє моделі прогнозувати розвиток дефекту в часі.

На основі симульованих або реальних даних (наприклад, вимірювань трансформатора з імітацією поступового перегріву обмоток та зростання часткових розрядів) було проведено порівняння трьох підходів:

1. Класифікатор на основі лінійних ознак (Baseline).
2. Чиста LSTM-модель.
3. Пропонована Гібридна CNN-LSTM модель.

На основі проведеного порівняльного аналізу трьох підходів до діагностики — базового класифікатора на основі лінійних ознак (Baseline), чистої моделі LSTM та пропонованої Гібридної CNN-LSTM моделі — були отримані наступні результати. Базовий класифікатор продемонстрував точність класифікації стану 78,5% при метриці F1-Score 0,75. Чиста модель LSTM значно покращила ці показники, досягнувши точності 89,2% та F1-Score 0,88, а також забезпечила прогностичну глибину в 10 кроків. Найвищу ефективність показала пропонована Гібридна CNN-LSTM модель, яка досягла точності класифікації 94,8% та F1-Score 0,95. Крім того, гібридна модель мала найбільшу прогностичну глибину, дозволяючи прогнозувати розвиток дефекту на 15 кроків вперед.

Обґрунтування: Гібридна модель CNN-LSTM демонструє значно вищу точність та F1-Score завдяки здатності одночасно враховувати просторові деталі (через CNN) та довгострокові часові залежності (через LSTM), що критично важливо для виявлення складних, повільно прогресуючих дефектів. Злиття ознак підвищує надійність системи.

Для підвищення довіри до СІД застосовується підхід Explainable AI (XAI), зокрема метод SHAP (SHapley Additive exPlanations). Це дозволяє визначити внесок кожного сенсорного показника у фінальне діагностичне рішення. Наприклад, у випадку прогнозування перегріву, SHAP-аналіз може підтвердити, що найбільший вплив мали показники температури обмоток та вмісту газів у маслі, а не вібрації. Це надає інженерам вагомі підстави для прийняття рішення.

Висновки. Розроблена Система інтелектуальної діагностики, заснована на злитті багатосенсорних даних та Гібридній CNN-LSTM моделі, довела свою ефективність у класифікації станів та прогнозуванні розвитку дефектів електроенергетичного обладнання. Ключовий науковий результат полягає у доведенні переваги гібридного підходу (точність 94.8%) над чистими моделями. Впровадження XAI-методів забезпечує необхідну прозорість процесу прийняття рішень системою ШІ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електропостачання та енергоменеджмент : наук.-допом. бібліогр. покажч. / [упоряд. О. В. Олабоді] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. – Київ, 2022. – 208 с.
2. Згорткові нейронні мережі / М.І Підгорецький – Режим доступу до ресурсу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/36766/1/Pidhorodetskyi_magistr.pdf
3. Штучний інтелект та інтелектуальні системи – Режим доступу до ресурсу: https://www.victoria.lviv.ua/library/students/sss2017/lecture.html

УДК 621.314.1
Стьопкін В.В., Білий В.В., Морозов М.В.
Український державний університет науки і технологій
E-mail: vasilstopkin@gmail.com

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗІ СПОСТЕРІГАЧЕМ СТАНУ ТА ПРУЖНИМИ ЛАНКАМИ

В роботі розроблена математична модель електропривода постійного струму зі спостерігачем. Оцінка швидкості спостерігачем здійснюється на підставі інформації про напругу живлення та струм двигуна. Замість безпосереднього вимірювання швидкості використовується спостерігач, який за допомогою виміряного струму якоря та напруги живлення змінює завдання на швидкість. Відтворення вектору координат системи та вектору збурень (моменту навантаження) здійснюється спостерігачем за помилкою у сталому режимі. Результати проведених досліджень на математичній моделі, при відповідному її налагодженні під умови конкретного електропривода, дозволяють суттєво зменшувати ударні навантаження на електропривод за рахунок точного узгодження швидкостей двох мас та з практичної точки зору надавати інформацію щодо розрахунків кінематичного кола та вибору оптимального передатного числа редуктору.
Ключові слова: електропривод постійного струму; спостерігач; датчик швидкості; момент інерції; різниця швидкостей; перерегулювання; статична помилка

Stopkin V., Bilyi V., Morozov M. Development of a mathematical model of a dc electric drive with a state observer and elastic links. The work developed a mathematical model of a DC electric drive with an observer. The observer estimates the speed based on information about the supply voltage and motor current. Instead of directly measuring the speed, an observer is used, which changes the task to speed using the measured armature current and supply voltage. The observer reproduces the system coordinate vector and the disturbance vector (load torque) in a steady-state error mode. The results of the research on the mathematical model, with its appropriate adjustment to the conditions of a specific electric drive, allow significantly reducing shock loads on the electric drive due to the precise coordination of the speeds of the two masses and, from a practical point of view, provide information on the calculations of the kinematic circle and the selection of the optimal gear ratio of the reducer.
Keywords: DC drive; observer; speed sensor; moment of inertia; speed difference; overshoot; static error

Постановка проблеми, аналіз досліджень і публікацій. У металургійній промисловості значна кількість електроприводів постійного струму працює з механічними передавальними механізмами, що містять пружні елементи. Використання електроприводів постійного струму є актуальним для Дніпровського регіону. Це потужні привода прокатних станів та головних механізмів кар'єрних екскаваторів із системами керування «генератор – двигун» (Г-Д) та «тиристорний перетворювач – двигун» (ТП-Д). Наприклад ПАТ ІНТЕРПАЙП Нижньодніпровський трубопрокатний завод (м. Дніпро) має прокатні електропривода постійного струму 480 кВт із системою Г-Д (тривалковий калібрувальний стан) та 3150 кВт із системою ТП-Д (прошивний стан). ТОВ ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ (м. Нікополь) має електропривода постійного струму трубопрокатних агрегатів ТПА 350 (прошивні стани – 3680 кВт, автомат стан – 2300 кВт, розкатні стани – 630 кВт, безперервний стан – 1900 кВт, редукційний стан – 1400 кВт, калібрувальний стан – 600 кВт). Такі системи керування побудовані з використанням лінійних пропорційних та пропорційно-інтегральних регуляторів. Параметри регуляторів задаються як

правило під час налагодження та не є оптимальними, що призводить до зниження енергоефективності агрегату. Вирішенням такої проблеми є розробка нових оптимальних систем керування. Одним із напрямків оптимального керування є побудова спостерігача стану або використання модальних регуляторів. Використання спостерігачів, як налагоджувальних моделей об'єкта є також одним із підходів до побудови адаптивної системи керування при умові наявності адекватної математичної моделі механічної частини електропривода. Крім того, наявність пружних ланок призводить до виникнення коливальних процесів під дією періодичних збурень, що спричиняє збільшення динамічних навантажень на елементи електричного та механічного обладнання, а також відхилення технологічних параметрів від заданих режимів. Коливання знижують перевантажувальну здатність електропривода та скорочують ресурс механічних передач через прискорений знос та втому матеріалів. Для зменшення амплітуди механічних коливань застосовуються електромеханічні системи із реалізацією активного електромагнітного демпфування. Традиційні підходи до синтезу структур та параметрів систем керування орієнтовані на мінімізацію впливу коливань механічної ланки на електропривод, але не враховують взаємодію електричної та механічної підсистем, яка є визначальною при наявності пружного зв'язку. Крім того, встановлення датчиків для вимірювання всіх змінних стану часто неможливе через умови експлуатації (ударні навантаження, вібрація, хімічно агресивні або радіоактивні середовища). Тому доцільним є використання спостерігачів стану, які дозволяють формувати необхідні сигнали зворотного зв'язку без фізичних сенсорів. Отже, актуальною є задача з розробки методів синтезу системи автоматичного керування пружним електроприводом із використанням корегувальних зворотних зв'язків, сформованих за допомогою спостерігача стану, з метою зниження механічних коливань та покращення динамічних характеристик ЕМС.

Розробкою, вивченням та вдосконаленням електроприводів зі спостерігачами стану займалися такі вітчизняні та зарубіжні вчені: Л.В. Акімов, В.І. Колотило, В.С. Марков, В.Б. Клепіков Н.А. Задорожній, В.В. Панкратов, А.Б. Виноградов, І.Я. Браславський та ін.

Проблеми моделювання спостерігачів із використанням додаткових зворотних зв'язків розглянуті в роботах [2-3]. Автором роботи [1] запропонована система керування двигуном постійного струму без датчика швидкості з реалізацією розширеного спостерігача Люенбергера для оцінки швидкості двигуна постійного струму при наявності збурювального моменту навантаження. В роботі [2] для спостерігача пружного електропривода використовуються додатково корегувальні зв'язки контурів керування. З метою скорочення датчиків СК для підвищення її надійності та зниження вартості, в роботі [3] запропонований спостерігач Калмана та додатковий зворотний лінійно-квадратичний зв'язок за станом. Оцінка стану двомасово електропривода при наявності еластичної муфти із використанням трьох методів: спостерігач Люенбергера, Калмана та нейронного оцінювання виконана у роботі [4] у програмі MATLAB. Поряд із використанням спостерігачів стану авторами [5] запропонована модель двомасового електропривода з модальним регулятором. Порівняльний аналіз пружного електропривода без спостерігача та з ним, виконаний в роботі [6].

Постановка завдання дослідження. Метою роботи є розробка математичної моделі пружного електропривода постійного струму на базі класичної моделі спостерігача повного порядку з метою зменшення ударних навантажень на електропривод за рахунок усунення коливальності швидкостей двох мас.

Викладення матеріалу. З метою дослідження динамічних властивостей пружного привода постійного струму зі спостерігачем стану, що відтворює певною мірою властивості об'єкта керування, була створена математична модель у програмному середовищі MATLAB, яка наведена на рисунку 1.

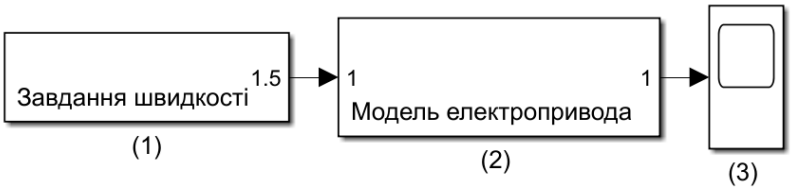


Рисунок 1 – Структурна схема математичної моделі пружного електропривода зі спостерігачем

Завдання швидкості реалізовано блоком (1). Підсистема (2) складається з класичної системи підпорядкованого регулювання координат з компенсуючими зворотними зв'язками та спостерігачем стану. На осцилограф (3) виведені графіки зміни швидкостей першої та другої маси електропривода у часі.

Режим роботи електропривода заданий у блоці Speed setting. На рис.2. наведена структурна схема моделі блоку (1) Speed setting.

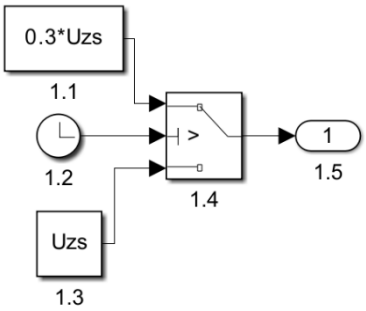


Рисунок 2 – Структурна схема блоку завдання швидкості (1)

Змодельовано режим роботи – розгін до номінальної швидкості та гальмування за часом 7с до швидкості 30% від номінальної. Для зміни навантаження на валу двигуна передбачений блок навантаження System (5) у складі підсистеми моделі електропривода (2) на рисунку 1.

На рис.4. наведена модель двомасового електропривода зі спостерігачем (див. рис.2, підсистема 3).

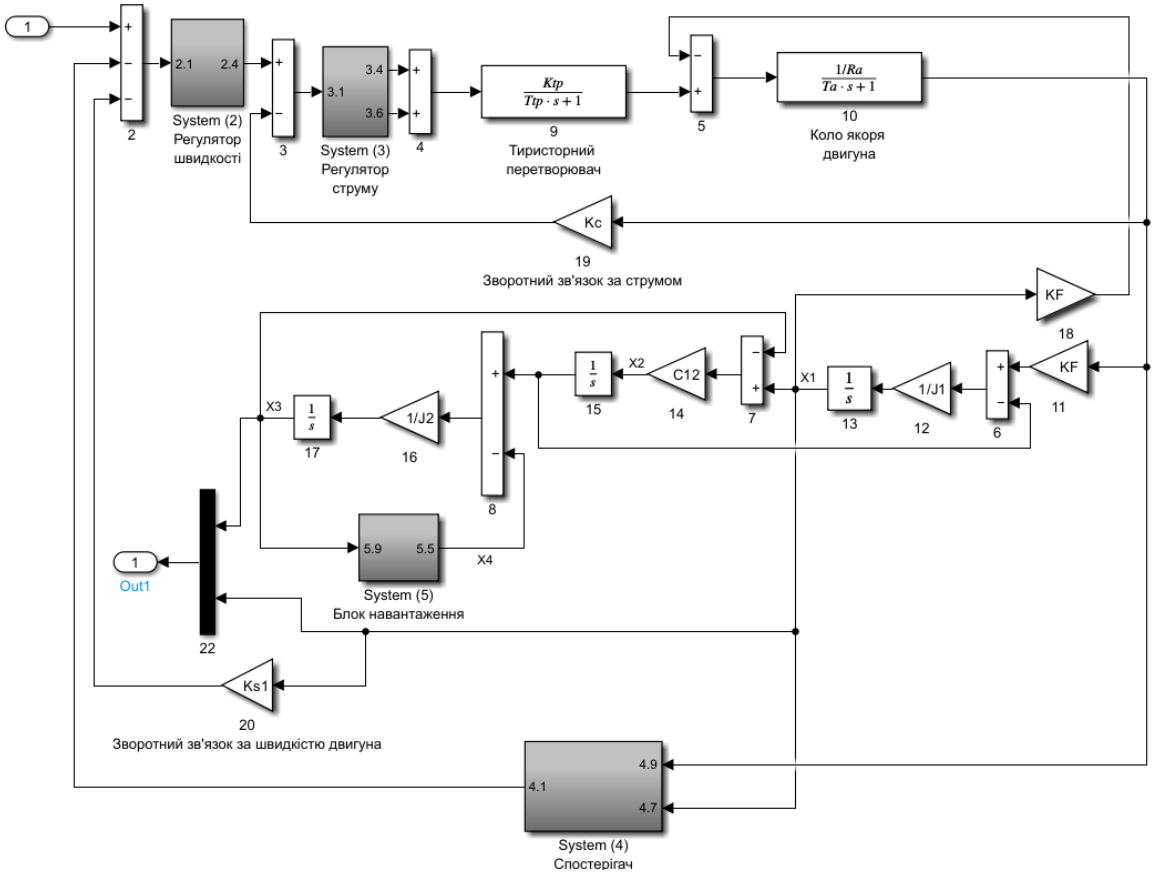


Рисунок 3 – Структурна схема моделі електропривода (2)

Налагодження спостерігача полягає в тому, щоб, практично не змінюючи характеру перехідного процесу за завданням, послабити вплив пружних коливань на роботу системи керування.

Модель електропривода (2), яка наведена на рис.3 зібрана в програмі MATLAB бібліотеки SIMULINK стандартними блоками: 1 – завдання на швидкість; 2, 3, 4, 5, 6, 8 – суматори; System (2)

– регулятор швидкості; System (3) – регулятор струму; 9 – передаточна функція тиристорного перетворювача; 10 – передаточна функція кола якоря двигуна; 11, 18 – конструктивний коефіцієнт двигуна; 12, 16 – моменти інерції першої та другої маси привода; 14 – коефіцієнт жорсткості; 13, 15, 17 – блоки інтегрування; System (4) – підсистема спостерігача; System (5) – блок навантаження; 19, 20 – коефіцієнти зворотного зв'язку за струмом та швидкістю.

Налагодження моделі електропривода зі спостерігачем (рис.3) виконувалось наступним чином. Було складено рівняння стану для об'єкта керування (див. рис.3, сингали x_1, x_2, x_3 та x_4):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \left(I_n \cdot KF - x_2\right) \cdot \dfrac{1}{J_1}; \\ \dot{x}_2 = \left(x_1 - x_3\right) \cdot C_{12}; \\ \dot{x}_3 = \left(x_2 - x_4\right) \cdot \dfrac{1}{J_2}; \\ \dot{x}_4 = 0, \end{cases} \quad \text{або} \quad \begin{cases} \dot{\omega}_1 = \left(I_a \cdot KF - M_p\right) \cdot \dfrac{1}{J_1}; \\ \dot{M}_p = \left(\omega_1 - x_2\right) \cdot C_{12}; \\ \dot{\omega}_2 = \left(M_p - M_c\right) \cdot \dfrac{1}{J_2}; \\ \dot{M}_p = 0. \end{cases} \tag{1}$$

Параметри спостерігача визначалися з матрично-векторної форми запису:

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x(t) + B \cdot I_a(t); \\ \omega_1(t) = C \cdot x(t), \end{cases} \tag{2}$$

На рисунку 4 наведена підсистема System (4) спостерігача із зазначеними матрицями стану за виразом (2).

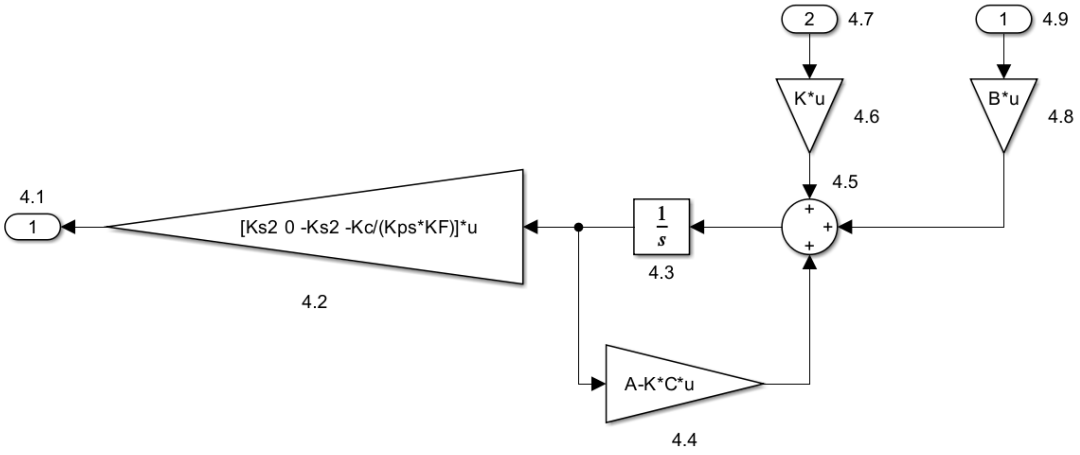


Рисунок 4 – Підсистема System (4) спостерігача

Матриця К спостерігача використовує вхідний сигнал за струмом двигуна та має вигляд:

$$K = \begin{bmatrix} b_3 \\ C_{12} \cdot \dfrac{J_1}{J_2} + C_{12} - J_1 \cdot b_2 \\ b_1 \cdot \dfrac{J_1}{C_{12}} - b_3 \cdot \dfrac{J_1}{J_2} \\ -\dfrac{b_0 \cdot J_1 \cdot J_2}{C_{12}} \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Коефіцієнти b_0, b_1, b_2, b_3 матриці (6) взяті для характеристичного рівняння за формою Баттерворта для четвертого порядку бажаного поліному спостерігача:

$$p^4 + b_3 Чp^3 + b_2 Чp^2 + b_1 Чp + b_0 = p^4 + 2{,}6 Чw_0 Чp^3 + 6 Чw_0^2 Чp^2 + 4 Чw_0^3 Чp + w_0^4. \quad (4)$$

Розрахунки параметрів електропривода зі спостерігачем, відповідно до параметрів електропривода, виконувались у m-файлі програми MATLAB.

Графіки перехідних процесів за кутовими швидкостями для математичної моделі зі спостерігачем наведені на рисунку 5.

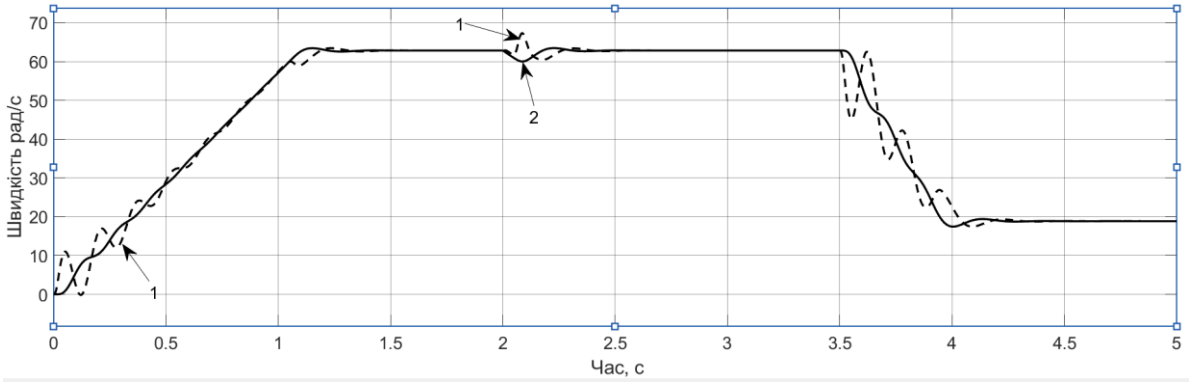


Рисунок 5 – Графіки перехідних процесів за кутовою швидкістю двигуна (1) та механізму (2) для математичної моделі зі спостерігачем

Висновки. Проведені дослідження впливу структури спостерігача повного порядку на неузгодженість швидкостей двох мас електропривода показали, що при конкретних заданих параметрам електропривода можна зменшувати ударні навантаження на привод. Показані недоліки систем керування приводами з корегувальними зворотними зв'язками, які пов'язані зі складністю розрахунків параметрів ланок при налагодженні та їх обмежених можливостей. Змодельована робота електропривода зі спостерігачем повного порядку при зношенні кінематичної передачі в електроприводі показала його переваги – зменшення коливальності швидкості.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. G. Sieklucki, "Optimization of Observers in a Two-Mass System - Dual LQ Problem," 2018 International Symposium on Electrical Machines (SME), Andrychów, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISEM.2018.8442808.

2. K. Szabat, A. Tokarczyk, K. Wróbel and S. Katsura, "Application of the Multi-Layer Observer for a Two-Mass Drive System," 2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 2020, pp. 265-270, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152577.

3. S´ebastien Carri`ere, St´ephane Caux, Maurice Fadel. Cross-synthesis of Observer and controller for a two-mass uncertain system. Proceedings of the 18th World Congress The International Federation of Automatic Control Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011. Access mode: https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1474667016456016?token=9828A41299401E1DFBDAE586A8D7226F2E11ED224FA3CCEA00BDCF39FDE3239D8F9799099F9F59A67FD9DEBD0021D0CA

4. Dominik ŁUCZAK, Adrian WÓJCIK. DSP implementation of state observers for electrical drive with elastic coupling. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 92 NR 5/2016. Access mode: http://pe.org.pl/articles/2016/5/19.pdf

5. Vasyl Stopkin, Vladimir Kazhan, Roman Demyanov, Vladislav Grodetsky. The task of modal control of a two-mass electromechanical system. System technologies. Regional interuniversity compendium of scientific works. Vol 3 No 128 (2020), Access mode: https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-128-2020-01

6. Стьопкін, В., & Ніколенко, А. (2019). Вплив корегувальних зворотних зв'язків на механічні коливання електропривода зі спостерігачем. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету, 9(1). Retrieved із https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/186.

УДК: 004.89

Юрченко Ю.В, Заковоротний О.Ю.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
E-mail: Yurii.Yurchenko@cs.khpi.edu.ua

ПІДГОТОВКА ТА АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ФІНАНСОВИХ ДАНИХ, ЯК ПОЧАТКОВИЙ ЕТАП СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Метою даної роботи є визначення ключових компонентів дослідницького середовища для застосування методів машинного навчання у стохастичному моделюванні фінансових часових рядів, із фокусом на аналізі відомих світових джерел фінансових стохастичних даних та демонстрації можливостей їх опрацювання за допомогою програмних платформ з інтегрованим інструментарієм машинного навчання.

Ключові слова: стохастичні числові ряди, ринкові котирування, платформи Kaggle, Huggingface, Yahoo!Finance, MATLAB, Python, Random Forest, імпутація, ROC, AUC, точність класифікації (Accuracy), достовірність позитивного прогнозу (Precision), середня абсолютна помилка (MAE), середня абсолютна відсоткова помилка(MAPE), середня квадратична помилка (MSE).

Yurchenko Yu., Zakovorotnyi O. Preparation and analysis of financial data sources as an initial stage of stochastic time series modeling using machine learning methods. The aim of this work is to identify the key components of a research environment for applying machine learning methods to the stochastic modeling of financial time series, with a focus on analyzing well-known global sources of financial stochastic data and demonstrating the possibilities of processing such data using software platforms with integrated machine learning tools.

Keywords: stochastic time series, market quotations, Kaggle, Hugging Face, Yahoo!Finance, MATLAB, Python, Random Forest, ROC, AUC,model accuracy, model precision, MAE (Mean Absolute Error), MAPE (Mean Absolute Percentage Error) та MSE (Mean Squared Error).

Постановка проблеми. Завдання створення дослідницького середовища для розроблення та оцінювання методів машинного навчання, застосовуваних до стохастичного моделювання часових рядів фінансової природи. На думку авторів, таке середовище повинно включати низку ключових компонентів:

1.Джерела вхідних даних, що охоплюють:

а) «сирі» дані реальних фінансових систем (ринкові котирування, біржові індикатори, макроекономічні показники тощо);

б) спеціально підготовлені датасети, сформовані на базі відкритих платформ і репозитаріїв для задач машинного навчання.

2.Програмну платформу для моделювання, бажано з вбудованим інструментарієм машинного навчання, що забезпечує можливість передобробки даних, побудови моделей та проведення експериментів.

Систему критеріїв оцінювання моделей, яка включає:

а) внутрішні метрики (релевантні показники якості моделі машинного навчання);

б) зовнішні критерії, що передбачають бенчмаркінг та порівняння з існуючими підходами та еталонними моделями.

У межах даної доповіді основна увага зосереджується на аналізі джерел вхідних даних, а також у якості прикладів роботи з джерелами виконано застосування базового загальновідомого алгоритму машинного навчання Random Forest до двох джерел даних в різних програмних середовищах з інструментарієм машинного навчання.

Базою стохастичного моделювання в фінансовій сфері є дані у вигляді часових рядів. Часовий ряд – це сукупність спостережень, зроблених послідовно протягом певного часу. Якщо майбутні значення можна точно передбачити на основі минулих значень, то ряд називається детермінованим. Однак більшість рядів є стохастичними або випадковими, оскільки майбутнє лише частково визначається минулими значеннями[1]. Особливо це стосується часових рядів в фінансовій сфері, ринкові дані в більшості є стохастичними часовими рядами.

У якості джерел вхідних даних для дослідження числових рядів з фінансової сфери за допомогою методів машинного навчання на автори пропонують :

1.Платформи постачання ринкових фінансових даних (Financial Market Data Providers / APIs) - джерела первинних фінансових часових рядів, наприклад:

- Financial Modeling Prep (FMP) – безкоштовне джерело первинної ринкової інформації,
- Yahoo ! Finance – безкоштовне джерело первинної ринкової інформації,
- NYSE API – платний API до Нью-Йоркської фондової біржі.

Платформи надають сирі ринкові дані, що є джерелом реальних часових рядів, наприклад FMP: часові ряди цін закриття, відкриття, миттєвих, максимумів, мінімумів та обсягів торгівлі фінансовими інструментами тощо. Ці платформи або мають описані в документації інтерфейси, або, як Yahoo Finance, що є одним з найвідоміших безкоштовних джерел фінансової інформації – open-source інтерфейс на мові Python.

2.Платформи відкритих датасетів для машинного навчання (Open ML Dataset Platforms) - джерела вторинних (підготовлених) даних для машинного навчання. Це ресурси, що надають готові датасети, сформовані, очищені або анотовані для ML-задач:

- Hugging Face – світова база датасетів та моделей машинного навчання;
- Kaggle – база датасетів та площадка світових змагань між моделями.

На відміну від платформ постачання первинних фінансових даних, ресурси типу Hugging Face та Kaggle характеризуються не лише наявністю «сирих» часових рядів, але й широким спектром вторинних, спеціально підготовлених датасетів у форматі “features + target”. Датасети вже структуровані таким чином, що кожен рядок відповідає окремому об’єкту спостереження та містить готові ознаки (фічі) і цільову змінну, що суттєво спрощує їх безпосереднє використання в моделях машинного навчання без додаткових етапів масштабної препроцесінгової роботи. Крім того, значна частина датасетів супроводжується прикладами моделей, кодом експериментів та посиланнями на наукові публікації, що досліджують відповідні дані, що підвищує їхню методологічну цінність для науковців. Особливої уваги заслуговує платформа Kaggle, яка функціонує як глобальне середовище змагань між ML-моделями: учасникам пропонується датасет і чітко визначена ціль прогнозування, а результати оцінюються за формалізованими метриками якості. За перші позиції у рейтингу передбачені грошові винагороди, що стимулює розвиток нових підходів і сприяє появі висококонкурентних моделей. Велика колекція економічних датасетів проаналізована і зібрана в Table 2 [2]. Тут можна побачити, що кожен датасет створений для певних задач машинного навчання (стовпець Task) – автори згрупували та завдання у вісім аспектів і проставили навпроти кожного датасету відповідний аспект:

- аналіз тексту (TA): наприклад, аналіз настроїв (sentiment analysis) фінансових новин;
- прогнозування (FO): наприклад, прогнозування руху цін на акції, тощо.

Враховуючи вищезазначену класифікацію джерел даних виконано два експерименти.

Експеримент №1 : дослідження роботи з датасетом HMEQ, розташованому на платформі Kaggle. Основна задача : пройти всі етапи формування моделі машинного навчання та етапи аналізу результатів роботи моделі, використовуючи інструментарій платформи MATLAB R2025b та порівняти створену модель з найкращими моделями, що застосовуються по цьому напрямку – прогнозуванню дефолтів. Датасет містить дані щодо характеристик та історії кредитів, а також ознаку дефолту позичальника, всього 5960 рядків. Основна мета цього датасету — надати інформацію для побудови моделі, яка прогнозує ймовірність дефолту клієнта, тобто вирішення задачі бінарної класифікації. У якості програмної платформи для дослідження вибраний MATLAB R2025b. У рамках дослідження застосовано алгоритм дерева рішень (Decision Tree) як базовий метод класифікації. Дерево рішень особливо підходить до задачі кредитного скорингу, оскільки забезпечує не лише високу точність, а й інтерпретованість результатів, що є критично важливим для фінансових рішень. Алгоритм дозволяє формувати послідовні правила прийняття рішення на основі багатьох фінансових ознак, виділяти ключові фактори ризику та наочно пояснювати причини віднесення клієнта до категорії дефолтних. Саме тому Decision Tree обрано як метод, оптимально поєднуючий прогностичну силу й прозорість моделі для завдань кредитного ризику.

Кожний рядок датасету HMEQ з точки зору машинного навчання є окремим прикладом або інстансом — тобто унікальним записом, що містить опис одного кредитного випадку з відповідними ознаками позичальника та фінансової історії. Такий підхід дозволяє алгоритму машинного навчання вчитися на множині випадків і прогнозувати результат (наприклад, дефолт чи його відсутність) на основі наявних ознак. Первинний аналіз датасету виявив наявність порожніх (відсутніх) значень у

ряді стовпців, зокрема у MORTDUE, що типово для фінансових даних. Для коректної роботи алгоритмів ML необхідно виконувати процедуру заповнення пропущених даних (імпутації). Основні методи імпутації в ML — це заміна порожніх значень на середнє, медіану, моду, інтерполяцію або рухоме середнє. У середовищі MATLAB ця задача легко вирішується, зокрема для стовпця MORTDUE використано команду:data.MORTDUE = fillmissing(data.MORTDUE, 'movmean', 5), що реалізує імпутацію методом рухомого середнього для послідовних пропущених даних - кожне пропущене значення заміниться на середнє з п'яти сусідніх значень навколо нього (включаючи наявні зліва і справа у межах вікна шириною 5). Таким чином, якісна підготовка даних є важливою складовою побудови ефективних ML-моделей.

В ході експерименту [7] виконуються стандартні для методів машинного навчання кроки: визначення цільової змінної(target), відділення ознак від цільової змінної (фічі), розподіл на тренувальну (70%) і тестову (30%) вибірки, навчання моделі дерева рішень, прогнозування на тестовій вибірці, обчислення точності моделі, вивід матриці плутанини, обчислення основних метрик класифікації, побудова ROC-кривої похибок. Матриця плутанини порівнює реальні (фактичні) значення з прогнозованими, відображаючи кількість правильних і неправильних класифікацій для кожного класу. Для задачі кредитного скорингу (виявлення дефолтних клієнтів) матриця плутанини є дуже показовою, оскільки дозволяє чітко побачити, скільки дефолтних кредитів модель виявила правильно, а скільки пропустила чи неправильно віднесла до недефолтних, і навпаки.

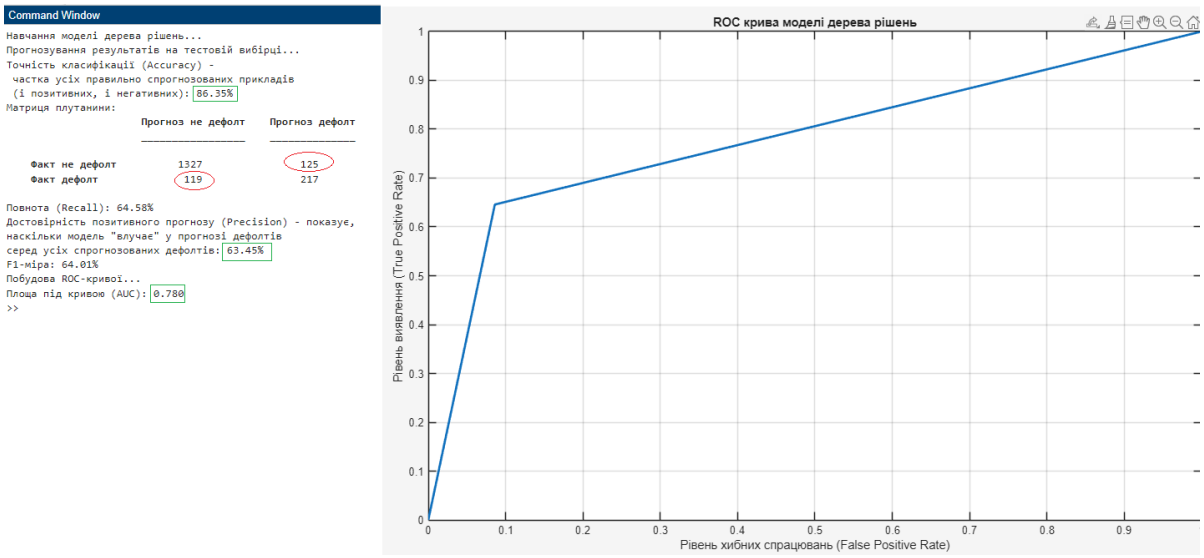


Рис. 1. Результат моделі з передбачення дефолту на датасеті HMEQ, побудованої в MATLAB

Модель дерева рішень для задачі прогнозування дефолту клієнтів показала такі результати: точність класифікації становить 86.35%, тобто більшість прикладів були класифіковані вірно. В цілому метрики свідчать про відносно рівномірну якість класифікації, модель не схильна ні до пропуску великої кількості дефолтів, ні до надмірно широкої групи ризику. ROC-крива для побудованої моделі знаходиться вище діагоналі випадкового класифікатора, площа під кривою (AUC) — 0.780. Це вказує на добру здатність моделі розділяти дефолтних і недефолтних клієнтів. Значення AUC > 0.7 традиційно вважається хорошим і відображає якісне розпізнавання кредитного ризику для обраної моделі.

Порівнюючи отриману модель з топовими SOTA (State-of-the-Art)-моделями для задачі прогнозування дефолту на HMEQ (і подібних фінансових датасетах) треба сказати, що останні мають суттєві переваги над класичними деревами рішень, так в [8] в Table. 1. Model Evaluation Results for Loan Prediction : Точність класифікації (Accuracy) та Достовірність позитивного прогнозу (Precision) всіх моделей більше 90%, що значно краще, ніж в моделі, побудованої в ході експерименту. Порівняння результатів показує, що для досягнення рівня SOTA-моделей у задачі прогнозування дефолту доцільно рухатись у напрямку використання ансамблевих алгоритмів, глибокого навчання та розширеного балансування класів для істотного підвищення показників якості моделі.

Експеримент №2 : дослідження джерела даних Yahoo!Finance. Основна задача : оцінка можливостей використання сирих ринкових даних, отриманих із платформи Yahoo!Finance, для

задач ML з використанням відкритого API "yfinance"(Python). Джерелом аналізу є "сирі дані" - історичні часові ряди цін акцій, які містять інформацію про ціну відкриття (Open), найвищу ціну дня (High), найнижчу ціну дня (Low), ціну закриття (Close), торгові обсяги (Volume) для обраного фінансового інструменту, зокрема Apple . Максимальна ємність джерела - дані про вартість акцій за кожні 5 хвилин за останні 60 днів = 1065 рядків;

У рамках експерименту було сформовано модель машинного навчання, яка навчається на п'ятихвилинних інтервалах цін акцій за 60 торгових днів (інтраденні дані). Тестування моделі здійснюється на окремому періоді — останні 2 години сесії (24 інтервали по 5 хвилин), що дозволяє об'єктивно оцінити якість та прикладну цінність алгоритму для короткострокових фінансових прогнозів. Такий підхід дає змогу проаналізувати ефективність роботи із сирими фінансовими даними Yahoo!Finance, їхню структуру, якість, а також перспективи застосування у наукових і практичних задачах часових рядів. Для цієї задачі використовується алгоритм RandomForest, що дозволяє враховувати складні нелінійні взаємозв'язки у фінансовому ряді.

Дані Yahoo!Finance є «сирими» часовими рядами, тому перед використанням у моделі Random Forest їх необхідно самостійно перетворити на повноцінний навчальний датасет: були створені лагові ознаки – тобто нові стовпці, що містять значення ціни закриття за попередні 5-хвилинні інтервали (lag_1, lag_2, …), сформовані шляхом зсуву колонки Close назад у часі. Далі було визначено цільову змінну як фактичну ціну закриття наступного інтервалу, отриману через зсув Close на один крок уперед (shift(-1)). Після видалення пропусків сформовані матриця ознак (X) і цільовий стовпець (y) стали основою для навчання моделі RandomForestRegressor.

Якості моделі оцінюють за основними метриками для регресійних задач часових рядів: MAE (Mean Absolute Error), MAPE (Mean Absolute Percentage Error) та MSE (Mean Squared Error). Вибір цих метрик обґрунтований їх прикладною інтерпретацією у фінансовій аналітиці: MAE характеризує середню похибку у доларах, MAPE — середній відсоток помилки, що дозволяє оцінити узгодженість прогнозу незалежно від масштабу, а MSE чутливий до значних промахів, що критично для ризик-менеджменту та оцінки надійності моделі. Такі метрики широко застосовуються у наукових роботах з фінансового регресійного прогнозування як найбільш інформативні щодо якості моделі.

```
Кількість рядків у тренувальному наборі (X/Y): 1065
CV MAE: 1.4615 ± 0.7106
CV MAPE: 0.0056 ± 0.0027
CV MSE: 4.2796 ± 3.0807

Порівняння реальних і прогнозованих цін за останні 2 години (5-хв інтервали), USD:
                              Actual   Predicted
Datetime
2025-11-20 15:40:00+00:00  274.120209  274.339165
2025-11-20 15:45:00+00:00  273.579987  273.730611
2025-11-20 15:50:00+00:00  273.350006  273.156261
2025-11-20 15:55:00+00:00  273.540009  272.886339
2025-11-20 16:00:00+00:00  272.989990  272.511971
2025-11-21 14:30:00+00:00  267.950012  269.672923
2025-11-21 14:35:00+00:00  268.279999  270.052271
Оцінка якості прогнозу за останні 2 години:
MAE: 0.3869
MAPE: 0.0014
MSE: 0.3432
```

Рис. 2. Результат моделі з прогнозу вартості акцій APPLE на сирих даних Yahoo!Finance

Аналіз отриманих результатів експерименту підтверджує високу зручність та практичність використання сервісу Yahoo!Finance як джерела для збору інтраденних котирувань акцій Apple. Дані легко інтегруються у сучасні програмні середовища, мають стандартизовану структуру, що суттєво спрощує підготовку вибірки і дозволяє автоматизувати процес побудови ознак. Однак кількість даних для тестового набору обмежується глибиною в 60 днів, таким чином, тестовий набір не перевищує 1065 рядків, а надійної оцінки ефективності на різних ринкових фазах (тренд, флет, волатильність) необхідно мати кілька тисяч рядків (тобто, дані за кілька місяців), то ж треба розглянути можливість використання інших джерел "сирої" фінансової інформації з більшою кількістю рядків для тренування.

Оцінка якості побудованої регресійної моделі показала низька відносна похибка - середнє MAPE (0.0056%), висока нестабільність - відношення стандартного відхилення до середнього значення (наприклад, для MAE 0.71 / 1.46 ≈49%) є дуже високим. Це головний недолік: модель працює дуже добре в деякі періоди та погано в інші. Це свідчить про слабку стійкість моделі до

зміни ринкових умов. Дійсно, фінансові часові ряди, мають стохастичну природу, що підтверджується численними теоретичними і практичними дослідженнями[1,9]. Характеристики розподілу фінансових рядів можуть змінюватися в кожен окремий період, а закони їх еволюції нерідко підпорядковуються складним випадковим процесам. Зміна волатильності, структурних зрушень чи інтервенцій ринку може призвести до того, що попередньо натренована модель втратить актуальність. Таким чином, отримані результати слід аналізувати в контексті обмежень і стохастичності фінансових рядів.

Висновки. У роботі було проведено дослідження та класифікацію можливих джерел фінансової інформації з часовими рядами. Було визначено, що ці джерела охоплюють "сирі" дані реальних фінансових систем (ринкові котирування, біржові індикатори) та спеціально підготовлені датасети, сформовані на базі відкритих платформ і репозиторіїв для задач машинного навчання. У подальшому, було проведено два експерименти, які показали, що вибір джерела даних і програмного середовища суттєво впливає на побудову моделей машинного навчання. В Експерименті №1 використовувався готовий датасет HMEQ на платформі Kaggle та середовище MATLAB. Завдяки тому, що дані вже були підготовлені, модель Decision Tree вдалося швидко побудувати й оцінити. MATLAB виявився зручним інструментом, оскільки має вбудовані засоби для обробки даних, навчання моделей і перегляду результатів.

У Експерименті №2 застосовувалась мова Python і сирі дані Yahoo!Finance про інтраденні ціни акцій Apple. Тут потрібно було самостійно створювати ознаки та готувати дані, але Python надав потужні інструменти для роботи з часовими рядами та побудови моделі Random Forest. Отримані результати показали, що такі дані можна використовувати для короткострокових фінансових прогнозів. Але кількість даних для у якості тренувального набору обмежена, тому в подальших дослідженнях треба розглянути інші джерела "сирих" фінансових числових рядів.

У підсумку: підготовлені датасети (як у MATLAB) підходять для швидкого навчання й аналізу моделей, а сирі ринкові дані (як у Python) дозволяють працювати ближче до реальних умов, але потребують більше обробки. Обидва підходи корисні, а MATLAB і Python забезпечують зручний і сучасний інструментарій для досліджень у сфері ML на даних фінансових часових рядів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. C.Chatfield. Time-series forecasting. USA: Chapman & Hall/CRC, 2000. 11,34 p.
2. Zheng X., та ін. FinBen: A Holistic Financial Benchmark for Large Language Models / Zheng X., та ін. // The Thirty-Eighth Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2024) Vancouver. URL: https://doi.org/10.52202/079017-3033 (Дата звернення 22.11.2025). 5 p.
3. Г. С. Іващенко та ін. Моделі глибокого навчання для прогнозування часових рядів/ Г. С. Іващенко та ін. // Control, Navigation and Communication Systems. 2024. No. 1 URL: https://www.researchgate.net/publication/378452251_MODELI_GLIBOKOGO_NAVCANNA_DLA_PROGNOZUVANNA_CASOVIH_RADIV (Дата звернення 22.11.2025).
4. FMP - Free Stock Market API and Financial Statements API. Documentation. URL: https://site.financialmodelingprep.com/developer/docs#economics (Дата звернення 22.11.2025).
5. Yahoo! Finance's API. Reference. URL: https://ranaroussi.github.io/yfinance/reference/index.html (Дата звернення 22.11.2025).
6. Датасет HMEQ_Data "Predict clients who default on their loan" і документація до нього. URL: https://www.kaggle.com/datasets/ajay1735/hmeq-data/data (Дата звернення 22.11.2025).
7. Програмний код експериментів. https://github.com/u75u275/MLDatasetsResearch.git (Дата звернення 22.11.2025).
8. Mohan Durga Sriram Bollu, та ін. Optimizing Loan Default Prediction with Advanced Ensemble Learning Models/ Mohan Durga Sriram Bollu, та ін.// Proceedings of the 4th International Conference on Information Technology, Civil Innovation, Science, and Management, ICITSM 2025, 28-29 April 2025, Tiruchengode, Tamil Nadu, India, Part II. URL: http://dx.doi.org/10.4108/eai.28-4-2025.2358020 (Дата звернення 22.11.2025).
9. Боярчук С., Тищенко І. Моделі прогнозування часових рядів arima та lstm в економіці та фінансах / Боярчук С., Тищенко І. // Computer design systems. theory and practice Vol. 7, No. 1, 2025. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2025/apr/38693/2517.pdf (Дата звернення 22.11.2025).

СЕКЦІЯ «МЕХАТРОННІКА ТА РОБОТИЗОВАНІ СИСТЕМИ»

УДК 621.9.04
[1]Гончар А. В., [2]Охримович М. Б.
[1]Луцький національний технічний університет
[2]ВСП «Ковельський промислово-економічний фаховий коледж ЛНТУ»

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА КІНЕМАТИЧНУ ТОЧНІСТЬ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАТИХ КОЛІС

В роботі проведено аналіз засобів контролю точності зубчатих коліс з точки зору забезпечення виготовлення деталей заданої якості. Вибрано методику проведення експериментальних досліджень колеса на кінематичну точність, що полягає у порівнянні колових відстаней між однойменними профілями двох зубів колеса з подібними відстанями між профілями інших двох зубів того ж колеса. Експериментально досліджено вплив технологічних режимів обробки процесу зубофрезерування зубчастого колеса на його показники точності. Під час виконання роботи використовувались метрологічні засоби та методи контролю зубчатих коліс.
Ключові слова: зубчасте колесо, кінематика, зубофрезерування, метрологія, шестерня.

Gonchar A., Okhrymovych M. The influence of technological factors on the kinematic accuracy of cylindrical gear wheels. The work analyzes the means of controlling the accuracy of gear wheels from the point of view of ensuring the manufacture of parts of a given quality. The method of conducting experimental studies of the wheel on the kinematic accuracy is selected, which consists in comparing the circular distances between the same profiles of two teeth of the wheel with similar distances between the profiles of the other two teeth of the same wheel. The influence of technological modes of processing the gear milling process on its accuracy indicators is experimentally investigated. During the work, metrological means and methods of controlling gear wheels were used.
Keywords: gear wheel, kinematics, gear milling, metrology, gear

Постановка проблеми. Прикладна механіка в машинобудуванні характеризується широким спектром використання зубчатих коліс, що застосовуються у механізмах для передачі обертальних рухів. Значну частину серед них складають циліндричні зубчасті колеса з прямими зубами [1]. Одним із основних показників якості зубчастих передач є їх точність. Точність виготовлення зубчастих коліс визначає їхні кінематичні та експлуатаційні показники [2]. Норми кінематичної точності регламентують повну похибку передаточного відношення – найбільшу похибку кута повороту: для зубчастого колеса – у межах його одного оберту. Величина та характер кінематичних похибок є вирішальними для зубчастих передач точних кінематичних ланцюгів, ділильних механізмів [3, 4]. Найбільш розповсюджені у машинобудуванні зубчасті передачі із ступенем точності 5… 9 [5]. Хоча вимоги до точності циліндричних зубчастих коліс зростають, в залежності від експлуатаційних вимог до зубчатого зачеплення, технологія їх виготовлення є більш простішою ніж для інших коліс [6].

Особливо для найпоширенішого методу виготовлення циліндричних зубчастих коліс зубофрезерування черв'ячними фрезами. Тому є актуальним встановлення оптимальних параметрів елементів технологічної системи, що пов'язані із забезпеченням вимог за показниками кінематичної точності, зокрема накопиченої похибки кроку колеса, зубчатого вінця під час зубооброблювання. Для цього необхідно виконання теоретичних і експериментальних досліджень, застосування відомих методик забезпечення точності зубчастих коліс на зубофрезерувальній операції.

Метою роботи є дослідження впливу технологічної системи на кінематичну похибку циліндричних зубчатих коліс та оптимізація режимів різання зубофорезерування для досягнення мінімального значення накопиченої похибки кроку колеса.

Аналіз досліджень і публікацій. З аналізу літературних джерел [8, 9] можна зробити висновок, що основними факторами, у процесі обробки зубчатих коліс, що впливають на точність їх виготовлення є: технологічне оснащення, точність базових поверхонь, кінематична точність зубооброблювальних верстатів, точність інструменту.

Сучасні досягнення у сфері конструювання та технології сприяють підвищенню точності та зменшенню похибок зубчастих передач [10]. Для зубофрезерування зубчатих коліс, в залежності

від їх форми та розмірів, використовуються різні методи та обладнання для встановлення і закріплення заготовок [11, 12]. Зокрема для нарізання зубчатого вінця на заготовках, що мають отвір, використовують оправки циліндричні або конічні, що закріплюються в спеціальному пристрої [13].

Важливе значення для обробки зубчастих коліс із заданою точністю мають і види затискачів у пристосуваннях. Так використання гідравлічного або пневматичного затискача із зусиллям, що діє в осьовому напрямі заготовки допомагає зберегти точність ділильної пари верстата, а у випадку ручного затискання заготовка не сприймає удари [14].

Основою виготовлення точних коліс є висока точність виготовлення оснащення. Для цього особлива увага приділяється зменшенню радіального биття і биття торця опорної поверхні зубчастого колеса. В результаті радіального биття технологічного оснащення, зубчатий вінець колеса, що обробляється розміщується ексцентрично відносно геометричної осі колеса і як наслідок утворюється його кінематична похибка [15]. Вплив на кінематичну похибку зубчатого колеса, що нарізується має також і жорсткість верстату. Чим вона більша, тим вища кінематична точність оброблюваного колеса [16].

Практично в усіх літературних джерелах відзначається, що конструкції технологічного оснащення для фрезерування зубчатих коліс на зубофрезерувальних верстатах повинні бути достатньо жорсткими, компактними за розмірами і мати високу точність.

Викладення основного матеріалу. Як об’єкт дослідження було вибрано деталь – шестерня передачі, що входить до складу коробки передач зернозбиральних комбайнів. Конструктивно шестерня представляє собою прямозубе зубчате колесо (число зубів Z=44). Внутрішня частина шестерні шліцьова (F=21) (рисунок 1). Виготовляється з конструкційної легованої сталі 18ХГТ ДСТУ 7806:2015.



Рисунок 1 – Шестерня передачі КПП

Заготовка шестерні – штамповка (2 клас точності, II група серійності) проходить термічну обробку – цементування: поверхні зубів HRC 57…64; серцевини зубів HRC 30…44; поверхні шліців HRC 36, що є характерним для зубчастих коліс транспортних засобів. Глибина цементації 0,8…1,2 мм.

Метод контролю колеса на кінематичну точність полягає у порівнянні колових відстаней між однойменними профілями двох зубів колеса з подібними відстанями між профілями інших двох зубів того ж колеса [7]. Покази похибки накопиченого кроку під час вимірювання відповідають відстані між контрольованими зубами і першою парою зубів, за якою будо проведено налагодження приладу. Вимірювання різниці кроків накопиченої похибки кроку по колесу, коливань колового кроку проводили за допомогою накладного крокоміру (тип 757), ЛИЗ, модуль 3-15, 2: 1 - 5 мкм (рисунок 2).

Для дослідження відбиралася партія деталей, що виготовляються за технологією групи компаній PALCHE (Україна). Нарізання зубів проводиться способом обкатування на зубофрезерному верстаті 5В312. В якості інструменту використовували черв'ячну фрезу, яка встановлювалася на оправку. Матеріал фрези Р6М5. Налагодження процесу зубофрезерування відбувалося за готовою деталлю - еталоном через налагодження черв’ячної фрези за попередньо обробленою впадиною.



Рисунок 2 – Накладний крокомір тип 757

Дослідження складалося із 12-и експериментів, що проводилися на деталях оброблених за такими режимами: швидкість різання v = 20…40 м⁄хв; подача S = 0,5…2,5 мм/об; глибина різання t = 0,5…2,2 мм. Величина накопиченої похибки колового кроку визначалася для 3-х деталей у кожному експерименті.

Проведене математичне планування експерименту дало можливість за 8-ма дослідами встановити, що мінімальна накопичена похибка колового кроку F_{pr}=23 мкм досягається за таких режимів зубофрезерування, як S=0,5 мм/об і t=0,5мм. Зміна швидкості під час обробки V=20…40 м/хв практично не має впливу на значення Fpr (рисунок 3, 4).

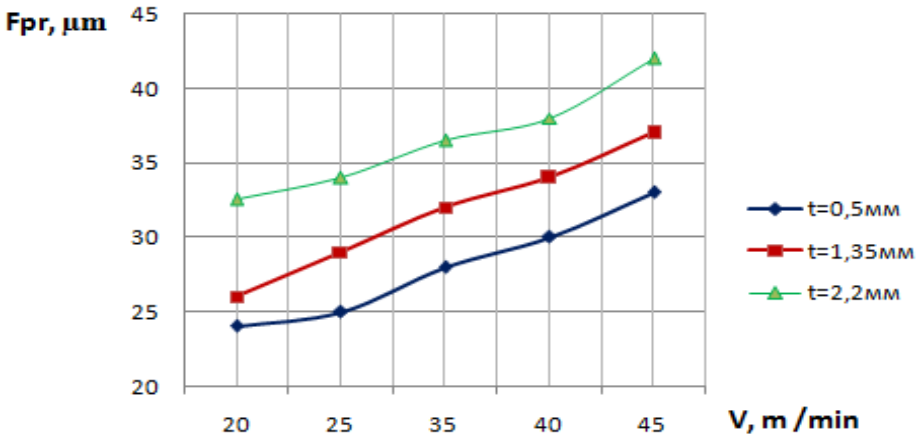


Рисунок 3 – Залежність накопиченої похибки колового кроку від швидкості для S=0,5 мм/об

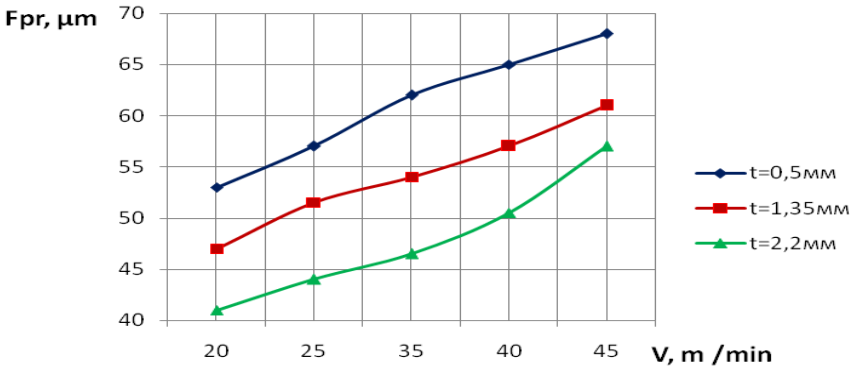


Рисунок 4 – Залежність накопиченої похибки колового кроку від швидкості для S=2,5 мм/об

Висновки. Проведено експериментальне дослідження величини накопиченої похибки колового кроку для зубчатих коліс, що оброблялися за режимами різання в таких межах, як V = 20…40 м⁄хв; S = 0,5…2,5 мм/об; t = 0,5…2,2 мм.

За результатами дослідження встановлено, що для мінімального значення Fpr =20…32 мкм необхідні режими оброки: S=0,5мм/об і t=0,5 мм. Швидкість різання може застосовуватися у прийнятих межах оскільки від неї Fpr значно не залежить.

Проведено оптимізацію технологічних факторів для забезпечення кінематичної точності зубчатих коліс з метою визначення оптимальних значень факторів S, V, t, які б забезпечували мінімальну накопичену похибку кроку, що прийняли за критерій оптимізації. Побудовано імперичну модель залежності Fpr від режимів різання методом повно факторного експерименту типу 2^3. За допомогою якої встановлено, що Fpr в значній мірі залежить від подачі та глибини різання, швидкість різання суттєво не впливає. Оптимальними значеннями є: S=0,5 мм/об і t=0,5мм, V =20 м/хв, що забезпечують $F_{pr\ min}$=23 мкм.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Shapovalov, O., Kolesnik, D., Pilipenko, O. Zastosovuvanist i zalezhnist parametriv zubchastyh peredach aviazijnyh reduktoriv vid tehnologichnyh prozesiv jih vygotovlennja Technical sciences and technologies. 3 (17), 37–48 (2019). DOI:10.25140/2411-5363-2019-3(17)-37-48
2. Pilipenko, O., Kolesnik, D., Berezniak, A.: Exactness and errors of gearing of helicopter reduxing gears. Technical sciences and technologies. 1(19), 18–31 (2020). DOI:10.25140/2411-5363-20209-1(19)-18-31
3. Iskovych-Lototskyi, R.D., Polishchuk, L.K., Polishchuk, O.V.: Tooth and threading metal cutting machines: тraining manual. Vinnytsia, Ukraine, 127 (2008)
4. Vullo, V.: The Geometry of Involute Spur Gears. Gears. Springer Series in Solid and Structural Mechanics. Springer, Cham , 10, 39-80 (2020). DOI:10.1007/978-3-030-36502-8_2
5. Ivanov, V., Dimitrov, L., Ivanova, S., Urum, G.: Industry 4.0 Approaches to the Standardization of Spur Bevel Gears. LNNS, Albania. 1069, 443-451, 2024. DOI:10.1007/978-3-031-66268-3_45
6. Klingelnberg, J. Manufacturing Process. In: Klingelnberg, J. (eds) Bevel Gear. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg 233-290 (2016). DOI:10.1007/978-3-662-43893-0_6
7. Goch G. Gear Metrology. CIRP Annals. 52(2), 659–695 (2003). DOI:10.1016/s0007-8506(07)60209-1
8. Palivoda, Yu.E., Kapatsila, Yu.B., Tkachenko I.G.: Gear wheel processing technology: tutorial. Ternopil, Ukraine, 136 (2016)
9. Kapil Gupta, R.F. Laubscher, J. Paulo Davimm, N.K. Jain.: Recent developments in sustainable manufacturing of gears: a review. Journal of Cleaner Production. 112(4), 3320-3330 (2016). DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.133
10. Antonyuk, V.: Modern technologies for manufacturing cylindrical gear wheels. Equipment and instruments for professionals. Metal processing series. 4, 6–18 (2007).
11. Hodgyai, N., Máté, M., Oancea, G., Dragoi, M.-V.: Gear Hobs–Cutting Tools and Manufacturing Technologies for Spur Gears: The State of the Art . Materials, 17(13), 3219 (2024). DOI: 10.3390/ma17133219
12. Kuznetsov, Y.N., Al-Refo, I.F.S., Dmitriev, D.A.: Construction and research of pyramidal arrangement milling machine-tool of triglide type. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. 13(4), 24–28 (2013)
13. Kamchatna - Stepanova Kateryna.: Modern methods of gear milling of hardened large-module gears. Scientific Journal of Polonia University. 43(6), 312–323 (2020) DOI: 10.23856/4340
14. Klochko A.A., Skorkin A.O., Kamchatnaya-Stepanova E.V. Starchenko E.P., Ishchenko G.I., Perminov E.V.: Unikal'nye tekhnologicheskie priemy zubofrezerovaniya krupnomodul'nyh cilindricheskih zubchatyh koles. Monthly international scientific journal "Research-science". 13, 19–24 (2020)
15. Hrytsai I.E.: Theoretical and applied foundations of complex scientific studies of the gear cutting process: monograph. Lviv, Ukraine: Spolom, 254 (2009)
16. Kuznetsov, Yu.M., Prydalnyi, B.I., Gao Xingmin: Technological Equipment of Milling Machines: Design, Theory and Practice: monograph. Lutsk, Ukraine: Vezha-Druk. 292 (2023)

УДК 621.865.8

Павлович А. О.
Луцький національний технічний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ЗАХОПЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ ПРОЕКТУВАННЯ

У даному дослідженні були проведені комплексні наукові дослідження відомих схем, конструкцій і елементів захоплюючих пристроїв та показані результати їх вдосконалення, дослідження та експлуатації. Виконано оцінку впливу характеристик механізмів структури конструктивних елементів на техніко-економічні показники захоплюючих пристроїв, у яких вони застосовуються. Розроблено рекомендації щодо впровадження удосконалених захоплюючих пристроїв, які ефективно працюють у певних типах технологічного обладнання.

Ключові слова: технологічне обладнання, захоплюючий пристрій, магнітні потоки, струменеві захоплювачі, промисловий робот.

Pavlovych A. Improvement of combined capturing devices and their design features. This study conducted comprehensive scientific research on known schemes, structures and elements of gripping devices and showed the results of their improvement, research and operation. The impact of the characteristics of the mechanisms of the structure of structural elements on the technical and economic indicators of gripping devices in which they are used was assessed. Recommendations were developed for the implementation of improved gripping devices that work effectively in certain types of technological equipment.

Keywords: technological equipment, gripping device, magnetic fluxes, jet grippers, industrial robot.

Постановка проблеми. Актуальність вдосконалення технологічних операцій на сучасному виробництві обумовлюється високим рівнем якості продукції, що випускається, підвищенням її конкурентоздатності на вітчизняному та світовому ринку, рядом інших важливих факторів.

Надзвичайно важливими в даній галузі є розробки і дослідження сучасних автоматичних пристроїв завантаження, розвантаження робочих машин штучними об'єктами до і після обробки у вигляді самостійних механізмів. Власне, досвід розробок і експлуатації таких технічних пристроїв дозволяє сьогодні створювати конструкції, які відрізняються простотою, надійністю, універсальністю, довговічністю, роботоздатністю і економічністю.

Ще одна безумовна актуальність – це розширення об'єму виробництва, покращення асортименту та якості продукції, зменшення рівня браку за рахунок нового сучасного технічного оснащення підприємства. Безумовно, основними засобами автоматизації технологічних процесів є пристрої завантаження і транспортування виробів.

Захоплюючі пристрої – це один із основних конструктивних елементів пристроїв завантаження (маніпуляторів, промислових роботів, живильників). Вони призначені для захоплення й утримування у процесі маніпулювання заготовок і деталей.

Метою даного дослідження є удосконалення комбінованих захоплюючих пристроїв промислового робота з аналізом його подальшої роботи.

Аналіз досліджень і публікацій. Захоплюючі пристрої поділяються на механічні, пневматичні, магнітні, адгезійні та електростатичні [1-3].

При механічному принципі немає інших сил взаємодії окрім контактних, які виникають, коли робочий елемент тисне на об'єкт [4].

Пневматичні захоплювачі, в свою чергу, розділяються на вакуумні, камерні, струменеві. Вони застосовуються для легких об'єктів маніпулювання [5].

Магнітні захоплювачі можна розділити на магнітні (з постійними магнітами) і електромагнітні, застосовуються для маніпулювання феромагнітними об'єктами [6].

Адгезійні та електростатичні захоплювачі використовуються для маніпулювання об'єктами невеликої маси, що виготовлені з немагнітних матеріалів, для захоплення невеликих неметалевих об'єктів [7].

Характерною ознакою технічних виробів є висока чутливість до механічного контакту. Через низьку міцність матеріалу, з якого вони виготовлені (скло, кераміка, прес-порошки тощо), або особливості їх конструкції (мала товщина стінок, тонкошарові покриття) тому і виникає завдання виключення ушкоджень. Це може бути вирішене застосуванням механічних захоплювачів з

пружними затискними елементами.

Камерні захоплюючі пристрої з еластичними камерами застосовують для переносу крихких виробів невеликої маси, неправильної форми або зі значними відхиленнями форми і розмірів. Ці захоплюючі пристрої забезпечують необхідну жорсткість і рівномірний розподіл зусиль затиску на поверхні об'єкта. Робота заснована на деформації еластичної камери від тиску повітря або рідини. Їх застосовують для утримання деталей як за зовнішню, так і за внутрішню поверхню.

Основними недоліком усіх камерних захоплювачів є низька довговічність, низькі силові характеристики, неможливість захоплення забруднених (маслом, стружкою) та нагрітих деталей також.

Робочим елементом вакуумних захоплювачів є присоска конічної форми з гуми або пластмаси. По трубці з порожнини присоски відсмоктується повітря, в ній виникає розрідження й об'єкт притягується до присоски. Вакуумні захоплюючі пристрої придатні для захоплення як сферичних так і плоских об'єктів [8].

За допомогою вакуумного насоса забезпечується створення вакууму. Тут розрідження створюється за рахунок енергії стиснутого повітря. Воно може бути створено одним ежектором для декількох присосок одночасно, або для кожної присоски може бути окремий ежектор. Потрібне для підняття деталі розрідження створюється притисканням до неї захоплювача, що приводить до видалення повітря з простору.

Тиск усередині камери істотно залежить від повітря, яке є по контуру присоски. Різниця тисків складає декілька десятих атмосферного тиску. Коли плоска деталь має витягнуту форму та отвори і прорізи, необхідно шукати суцільні площадки між отворами, по можливості ближче до центру мас. Для розширення можливостей використовують – або змінюють форму присоски в плані, або виконують вакуумний захоплюючий пристрій у вигляді декількох присосок. Кріплення присосок до рами тому робляться шарнірними. Це робиться для того, щоб перекоси не позначалися на надійності контакту присоски з об'єктом. Якщо захоплюється тонкий лист, що сильно прогинається під власною вагою, то шарнірне закріплення дає можливість пристосовуватися до змін форми цього листа.

Вакуумні захоплювачі використовуються для захоплення об'єктів за криволінійні поверхні [9].

Загальним недоліком вакуумних захоплювачів є низька надійність закріплення замаслених об'єктів після їх механічної обробки. Тому доводитися обмежувати швидкість маніпулювання об'єктом, а це, в свою чергу, негативно відбивається на продуктивності виконання технологічних операцій.

Для забезпечення герметичності камери вакуумування краї присоски роблять широкими. При обслуговуванні пресів завантаження заготовки здійснюється роботом із вакуумним захоплювачем, а після вирубки отворів і гнуття її можна захопити механічним захоплювачем.

Електромагнітні захоплювачі представляють собою корпус, який виконаний з низько вуглецевої сталі. Усередині нього розміщені котушки, які захищені від ушкоджень листом із марганцевистої сталі. Найпростішим є кільцевий електромагніт з одною обмоткою. Для збільшення несучої здатності електромагніти виконують багатополюсними. Магнітні захоплюючі пристрої роботів із плоскою поверхнею робочого елемента при захопленні об'єктів за площину мають велику несучу здатність. Спеціальні електромагнітні захоплюючі пристрої високої несучої здатності можна отримати тоді, коли форма їх робочої поверхні не плоска [10, 11].

При захопленні тонкостінних об'єктів електромагніти встановлюють на одній рамі, а при можливості великих деформацій об'єкта закріплення робиться не жорстким.

Важливою перевагою електромагнітних захоплюючих пристроїв є можливість дистанційного захоплення. Для живлення електромагнітів використовується постійний струм. Але, щоб електромагнітне поле проникало тільки на малу глибину, ще використовується живлення змінним струмом. При цьому відбувається індукційний нагрів, що може бути корисним при відділенні замасленої заготовки від стосу [12].

Недоліком електромагнітних захоплювачів є можлива дезорієнтація об'єктів під час включення і відключення живлення котушки.

Як і у випадку вакуумних захоплювачів, замаслювання або зволоження поверхні деталі може привести до зісковзування її з магніту при транспортуванні. При використанні магнітних захоплювачів варто взяти до уваги ще такі моменти. Якщо робот застосовується для операцій металообробки, то до магніту може прилипати стружка, його потрібно періодично очищати.

Необхідно враховувати можливість намагнічування деталі в процесі її захоплення і транспортування магнітним захоплювачем [13, 14].

Викладення основного матеріалу. Розроблений пристрій промислового робота для стискувальних операцій містить стикувальний вузол маніпулятора, стикувальні вузли робочих органів, із закріпленими робочими органами. Стикувальні вузли маніпулятора і робочих органів мають стикувальні робочі площини. Крім того, стикувальний пристрій промислового робота містить роз'ємні оптронні пари (випромінювачі 11 і приймачі 12, рисунки 1, 2), закріплені в отворах обох стикувальних вузлів маніпулятора і робочих органів для передачі інформації від маніпулятора до робочих органів і навпаки.

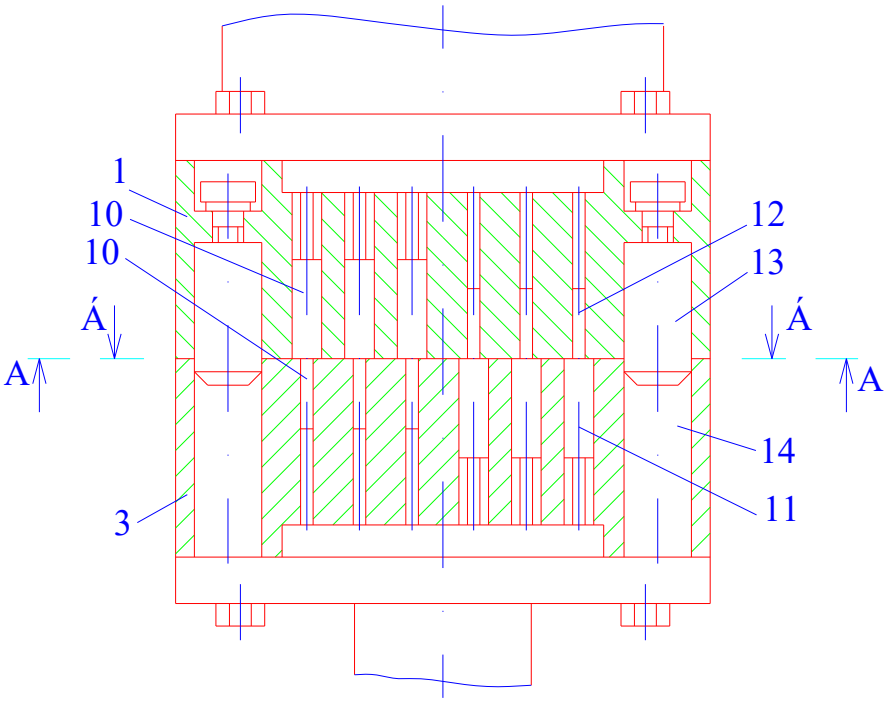
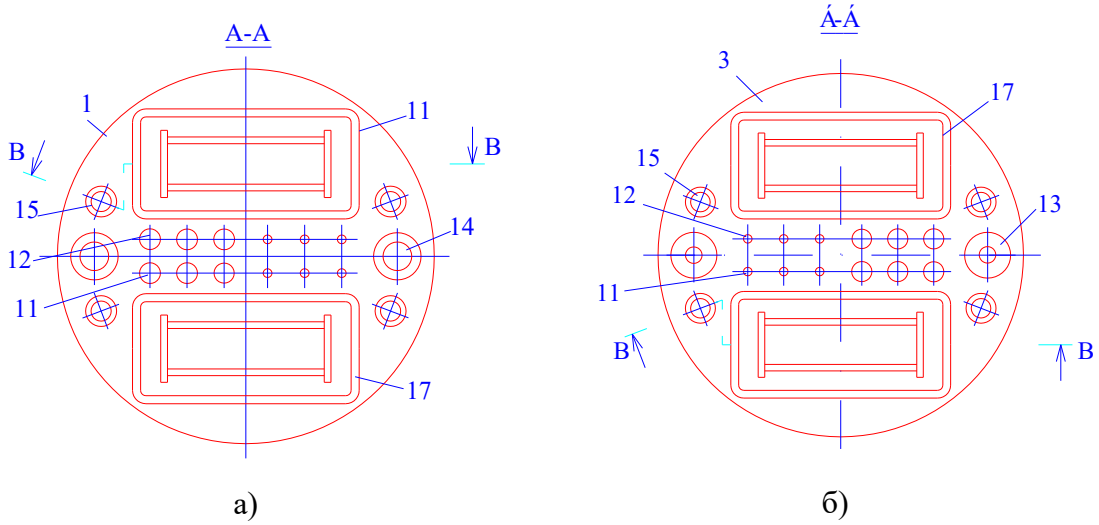


Рисунок 1 – Фронтальний розріз стикувального пристрою



а) б)

Рисунок 2 – Вид зверху стикувального пристрою

Стикувальний вузол маніпулятора містить направляючі штифти 13, а стикувальні вузли мають направляючі отвори 14 під штифти 13. Стикувальний пристрій має стиковані пневматичні і гідравлічні лінії 15, електромагніти 16, магнітопроводи 17 з вихідними обмотками 18 (рисунки 3, 4).

Електромагніти 16 містять внутрішні полюсники 19 і зовнішні охоплюючі полюсники 20, вхідні обмотки 21, закріплені між внутрішніми 19 і зовнішніми охоплюючими 20. Корпуси стикувальних вузлів маніпулятора і робочих органів виконані з немагнітного матеріалу. Внутрішні полюсники 19 електромагнітів 16 містять постійні магніти 22. Полюсники 19 і 20 виконані з електротехнічної сталі з низьким коефіцієнтом залишкової намагніченості

Магнітопроводи 17 містять додаткові вихідні обмотки 23 в корпусах стикувальних вузлів робочих органів 3. Електромагніти 16 і магнітопроводи 17 утворюють роз'ємні трансформатори з вхідними обмотками 21 і вихідними обмотками 18. Стикувальний вузол маніпулятора оснащений джерелами постійної 24 і змінної 25 напруг. Виходи джерел напруг 24 і 25 сполучені з входом комутатора 26, виходи комутатора 26 - з вхідними обмотками 21 роз'ємних трансформаторів (рисунок 1). Джерела постійної 24 і змінної 25 напруг через комутатор 26 живлять вхідні обмотки 21 пульсуючою напругою.

Джерело постійної напруги 24 необхідне для збільшення стикувального зусилля та для шунтування постійного магніту 22 при розстиковці робочих органів. Джерело змінної напруги 25 потрібне для передачі енергії живлення до робочих органів. Стикувальний пристрій промислового робота також може мати варіант з роздільною передачею електричної енергії, коли є два типи електромагнітів 16 - з постійними магнітами 22 і без постійних магнітів. До електромагнітів 16 з постійними магнітами 22 стикувального вузла маніпулятора приєднані магнітопроводи 29 у вигляді пластин, закріплені в стикувальних вузлах робочих органів.

До електромагнітів 16 приєднані магнітопроводи 17 з внутрішніми 19 і зовнішніми 20 полюсниками і додатковими обмотками 23. Причому магнітопроводи 29 також виконані з електротехнічної сталі з низьким коефіцієнтом залишкової намагніченості. Електромагніти 16 без постійних магнітів утворюють також роз'ємні трансформатори. Джерело змінної напруги 25 для конструктивного виконання роз'ємних трансформаторів без постійних магнітів (рис. 4.8) живить вхідні обмотки 21 струмом

Стикувальний вузол маніпулятора за допомогою руки маніпулятора 2 може стикуватися шляхом введення направляючих штифтів 13 (рисунок 2) у відповідні отвори 14 стикувальних вузлів робочих органів до стулення робочих площин 9. При цьому зістиковуються роз'ємні оптронні пари 10 для передачі зустрічної інформації. Потім зістиковуються пневматичні і гідравлічні лінії 15. Стикувальний вузол робочого органу притягується до стикувального вузла маніпулятора 2 і утримується за допомогою роздільної або сумісної дії постійних магнітів 22 і електромагнітів 16.

Стикувальний пристрій промислового робота має декілька режимів роботи: захват і утримання робочого органу електромагнітами 16 і постійними магнітами 22, захват і утримання робочого органу електромагнітами 16 і постійними магнітами 22 з передачею електричної енергії вихідним обмоткам 18, захват і утримання робочого органу постійними магнітами 22, відстикування робочого органу.

Захват й утримання робочого органу 4-8 електромагнітами 16 і постійними магнітами 22 проводиться таким чином. Стикувальний вузол маніпулятора 1 підводиться до стикувального вузла робочого органу 3 в стані, коли поле постійних магнітів 22 нейтралізовано полем електромагнітів 16, що живляться від джерела постійної напруги 24 через комутатор 26. Після стулення стикувальних робочих площин 9 комутатор 26 міняє полярність живлячої постійної напруги обмоток 21 на протилежну. При цьому напрями магнітних потоків обмоток 21 співпадають з напрямами магнітних потоків постійних магнітів 22.

Захват і утримання робочого органу електромагнітами 16 і постійними магнітами 22 проводиться таким чином. Стикувальні вузли маніпулятора 1 і робочого органу 3 зімкнуті. На обмотки 21 електромагнітів 16 через комутатор 26 подається пульсуюча напруга. Постійна складова струму викликає магнітний потік. Сумарні магнітні потоки електромагнітів 16 і постійних магнітів 22 притягають магнітопроводи 17 стикувального вузла робочого органу 3 і утримують його. Змінна складова струму наводить ЕРС взаємоіндукції на вихідних обмотках 18 і 23 роз'ємного трансформатора.

Захват і утримання робочого органу постійними магнітами 22 проводиться таким чином. Стикувальний вузол маніпулятора 1 підводиться до стикувального вузла робочого органу 3 в стані, коли поле постійних магнітів 22 нейтралізовано полем електромагнітів 16. Після стулення робочих площин 9 комутатор 26 відключає живлення. Магнітні потоки постійних магнітів 22 притягають магнітопроводи 17 і утримують його. Переваги цього режиму виявляються у разі аварійного відключення електроенергії.

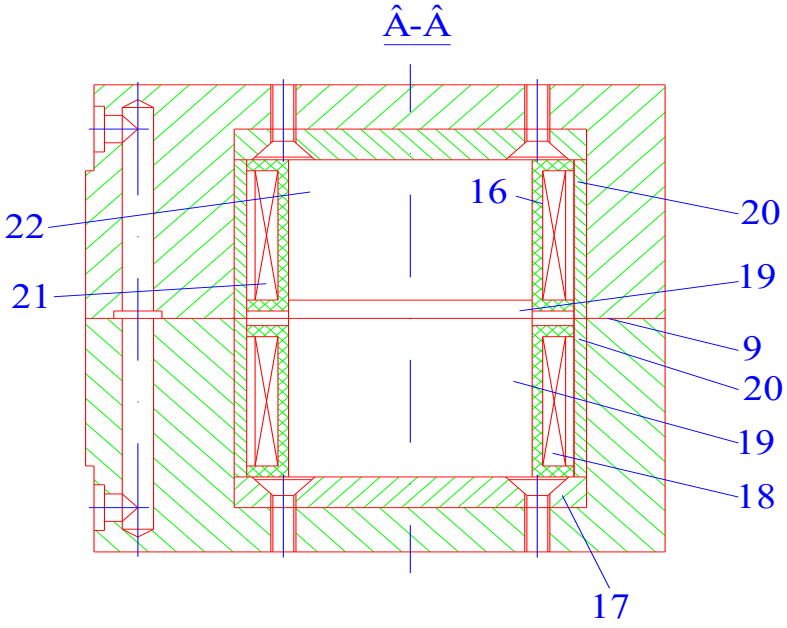


Рисунок 3 – Переріз В-В стискувального вузла

Відстиковка робочого органу проводиться за рахунок подачі напруги зворотної полярності від джерела постійної напруги 24 через комутатор 26. Протікаючий по обмоткам 21 електромагнітів 16 електричний струм викликає магнітний потік, який нейтралізує магнітний потік постійних магнітів 22. При цьому електромагніти 16 стикувального вузла маніпулятора більше не утримують магнітопроводи 17 стикувального вузла робочого органу 3 і розстиковка проводиться без зусиль.

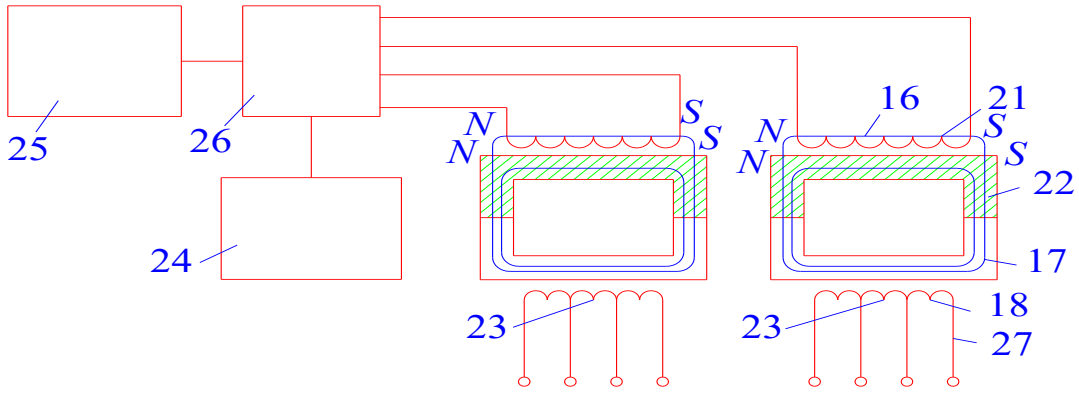


Рисунок 4 – Схема пристрою при роботі в режимі максимального зусилля

Варіант стикувального пристрою промислового робота (рисунок 5) також працює в розглянутих режимах від джерела змінної напруги 25 через комутатор 26 на обмотки 21 подається змінна напруга. Можна збільшити зусилля утримання магнітопроводів 17 за рахунок подачі пульсуючої напруги на обмотки 21.

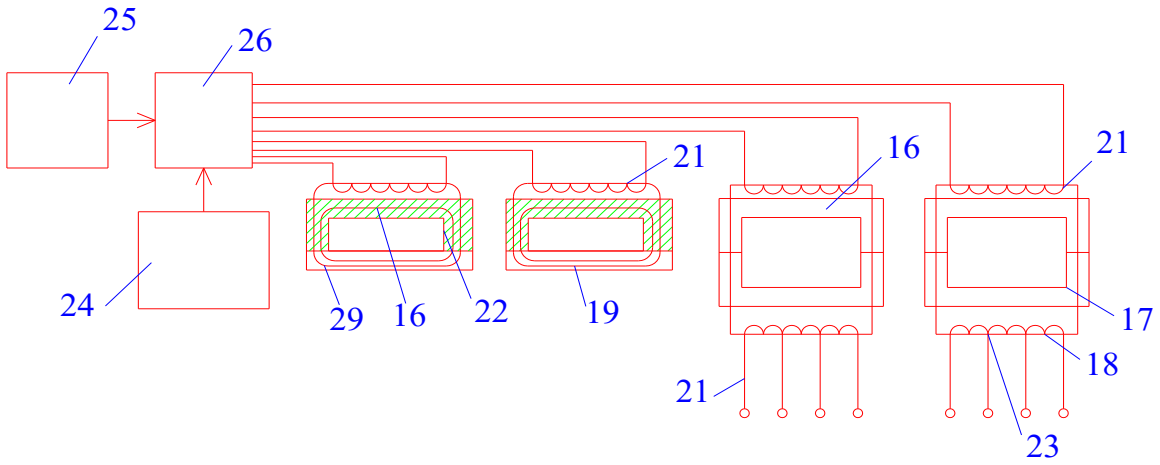


Рисунок 5 – Схема пристрою з роздільною передачею електричної енергії

Безконтактна передача інформаційних сигналів і силової електроенергії дозволяє покращити завадозахищеність і підвищити надійність передачі. Застосування магнітної фіксації сприяє процесу стиковки за рахунок зменшення довжини направляючих штифтів і, відповідно, ходу стиковки.

Застосування магнітної фіксації стикувальних вузлів дозволяє спростити конструкцію пристрою за рахунок: відсутності механічної фіксації, переміщення направляючих штифтів в стикувальний вузол маніпулятора і скорочення загального числа штифтів.

Висновки. В даному науковому дослідженні було удосконалено комбіновані захоплюючі пристрої промислового робота з відповідним аналізом літературних джерелах щодо захоплюючих пристроїв. Були проведені комплексні дослідження схем, конструкцій і елементів відомих захоплюючих пристроїв. Отримано результати щодо вдосконалення, дослідження та експлуатації захоплюючих пристроїв, показаний вплив характеристик механізмів структури конструктивних елементів захоплюючих пристроїв.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Дмитрієв Д.О. Кінетостатичний аналіз каркасних компоновок верстатів з механізмами паралельної структури // Науковий журнал "Технологічні комплекси" №2, 2020. – С.40-45.

2. Борозенець Г.М., Павлов В.М., Семак І. В. Деталі машин : Навчальний посібник. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2021. – 220 с.

3. Головня В.Д. САПР технологічних процесів: конспект лекцій / В.Д. Головня. – Житомир : Житомирська політехніка, 2019. – 200 с.

4. В. Боярчук Особливості проектування комбінованих захоплюючих пристроїв // Тези IV студентської науково-технічної конференції факультету транспорту та механічної інженерії “Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії ” (16 листопада 2024 року). – Луцьк: ЛНТУ – 2023 – С.6-9.

5. Ямпольский Л.С. та ін. Елементи робото технічних пристроїв і модулі ГВС: Підручник / Л.С. Ямпольський, М.М. Поліщук, М.М. Ткач; За заг. ред. Л.С. Ямпольского. – К.: Вища шк., 2022. – 431 с.: іл

6. Патент США №3343864 Material handling apparatus and the like / BAER JAMES/ Опубліковано 1967-09-26. 8.

7. Патент США №2002157388A1 Pump-integrated flexible actuator /SETO TAKESHI, TAKAGI KUNIHIKO/ Опубліковано 2002-10-31. 9.

8. Патент США №4815782A Grappling device /CRAIG PRESTON S, FISHER JEFFREY/ Опубліковано 1989-03-28.

9. Павленко І.І., Мажара В.А. Роботизовані технічні комплекси / Под ред. Павленко 1.1. - Навчальний посібник 2012 - 393с.

10. Khalifa H. Harib, Kamal A.F. Moustafa, A.M.M. Sharif Ullah and Salah Zenieh: Parallel, Serial and Hybrid Machine Tools and Robotics Structures: Comparative Study on Optimum Kinematic Designs - 110-124p.

11. Технологічні машини. Розрахунок і конструювання: Навчальний посібник / Ю.В. Кодра, З.А. Стоцько; За ред. З.А. Стоцька. – Львів: Бескид БІТ, 2018. – 466с.

12. Павленко І.І., Мажара В.А. Продуктивність функціонування двозахватних промислових роботів на позиціях допоміжних пристроїв // Прогресивні технології і системи машинобудування. Міжнародний збірник наукових праць. – Вип. 30 – Донецьк: ДонНТУ, 2015. – С. 170 – 175.

13.Павленко І.І., Мажара В.А. Конструктивно-кінематична структура двозахватних пристроїв промислових роботів // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Вип. 19 – Краматорськ – Київ, 2006. – С. 104 – 109.

14. Антонюк В.С., Клименко С.Ан., Клименко С.А. Теплові явища при обробці різанням: Навч. посібник. – К.: НТУ України «КПІ», 2014. – 156 с.

УДК 620.1.051

Слабкий А. В., Котик С. І.
Вінницький національний технічний університет

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ТА ПЕРСПЕКТИВИ МОДЕРНІЗАЦІЇ УНІВЕРСАЛЬНИХ ВИПРОБУВАЛЬНИХ МАШИН

Проведено аналіз класифікацій та конструкцій випробувальних машин. Детально розглянуто особливості універсальних електрогідравлічних машин на прикладі поширеної моделі Р-20, визначено її конструктивні переваги (висока жорсткість силової рами) та експлуатаційні недоліки (ручне управління, застарілі засоби вимірювання). Проведено порівняльний аналіз технічних характеристик Р-20 із сучасними закордонними електрогідравлічними аналогами (LF-200-S, ETM205, HUT205, WAW). Встановлено, що сучасні машини використовують той самий принцип, але з інтегрованими цифровими системами керування та тензометричними датчиками. На основі аналізу обґрунтовано економічну доцільність та технічну можливість глибокої модернізації існуючого парку машин типу Р-20.

Ключові слова: випробувальна машина, розривна машина, модернізація, Р-20, електрогідравлічний привод, аналіз конструкцій, класифікація.

Slabyi A. V., Kotyk S. I. Analysis of designs and prospects for modernization of universal testing machines. An analysis of classifications and designs of testing machines was conducted. The features of universal electro-hydraulic machines are examined in detail using the common R-20 model as an example, identifying its structural advantages (high rigidity of the power frame) and operational disadvantages (manual control, outdated measuring tools). A comparative analysis of the technical specifications of the R-20 with modern foreign electro-hydraulic analogs (LF-200-S, ETM205, HUT205, WAW) was performed. It was established that modern machines use the same principle but with integrated digital control systems and tensometric sensors. Based on the analysis, the economic feasibility and technical possibility of deeply modernizing the existing fleet of R-20 type machines are substantiated.

Keywords: testing machine, tensile machine, modernization, R-20, electro-hydraulic drive, design analysis, classification.

Постановка проблеми. Визначення механічних властивостей матеріалів є ключовим етапом у інженерії, контролі якості та наукових дослідженнях. Для цього використовують випробувальні (розривні) машини[1]. Сучасні вимоги до точності, автоматизації процесу та цифрової реєстрації даних ставлять під сумнів ефективність застарілого обладнання, яке досі масово експлуатується у багатьох лабораторіях України.

Огляд актуальних досліджень. Сучасний ринок пропонує широкий спектр випробувальних машин. Їх класифікують за видом пристрою створення навантаження (електрогідравлічні, електромеханічні) [2] та за видом випробовуваних матеріалів (метали, полімери, будівельні матеріали тощо). Попри наявність новітніх електромеханічних систем, значна частина лабораторного парку складається з універсальних електрогідравлічних машин типу Р-5...Р-100 (ДСТУГОСТ 7855-74).

Зв'язок з практичними проблемами. Повна заміна застарілого парку випробувальних машин (як Р-20) на сучасні комплекси є економічно невиправданою для багатьох підприємств та навчальних закладів. Водночас, існуючі машини часто мають високу жорсткість силової рами та

значний ресурс. [5] Це створює практичну проблему: як забезпечити сучасний рівень випробувань (автоматизація, точність, звітність) за мінімальних капіталовкладень.

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є аналіз конструктивних переваг та недоліків поширених електрогідравлічних машин (на прикладі Р-20) у порівнянні з їх сучасними закордонними аналогами, для обґрунтування найбільш раціонального шляху оновлення лабораторного парку обладнання.

Основна частина

1. Загальна класифікація випробувальних машин

Випробувальні машини – це пристрої для визначення механічних властивостей матеріалів6. Залежно від мети дослідження, їх можна класифікувати за низкою ознак. [8]

За видом випробування:

— випробування на розтяг;
— випробування на стиск;
— випробування на згин;
— випробування на кручення;
— випробування на повзучість та тривалу міцність.

За видом пристрою створення навантаження машини поділяються на електрогідравлічні та електромеханічні.

За видом навантаження – на машини зі сталою швидкістю деформування (жорстке навантаження) та зі сталою швидкістю навантаження (м'яке навантаження). Більшість сучасних машин є універсальними, тобто дозволяють проводити різні види випробувань шляхом встановлення додаткових вимірювальних систем.

2. Аналіз універсальних електрогідравлічних машин

Типовим і найбільш поширеним представником цього класу в Україні є машини серії Р (Р-5, Р-10, Р-20, Р-50, Р-100), що відповідають ГОСТ 7855-7417. Вони являють собою установку з пульту керування та навантажувального пристрою з гідроприводом [2].

Конструктивні особливості машин типу Р19:

Переваги: вертикальне двоколонне виконання, суцільнолиті траверси та висока жорсткість силової рами, що забезпечує великий ресурс та надійність механічної частини.

Недоліки: ручне управління процесом навантаження, гідравлічна система створення навантаження , застарілий тип сило вимірювача (торсіонний гідравлічний) та засіб запису параметрів (стрічковий самописець).

Ці недоліки унеможливлюють автоматизацію процесу та отримання результатів у цифровому вигляді для подальшої обробки [7].

Для порівняння, в таблиці 1 представлені характеристики машини Р-20 та її сучасних закордонних аналогів, які також використовують електрогідравлічний принцип.

Таблиця 1 – Основні технічні характеристики розривних машин

Параметр	Характеристика машини				
	LF-200-S	ETM205	P-20	HUT205	WAW
Найбільше граничне навантаження, кН	200	200	200	200	200
Діапазон вимірюваних навантажень, кН	0-125 0-200	0-200	0-40 0-100 0-200	0-200	0-200
Швидкість переміщення активного захвату без навантаження, мм/хв	0-200	0-250	0-100	0-180	0-180
Максимальний хід траверси (поршня), мм	715	1150	300	150	250
Ширин тестового простору, мм	420	650	504	410	435
Габаритні розміри					
довжина, мм	700	1210	1553	1150	720
ширина, мм	700	770	972	600	560
висота, мм	2380	2600	2901	900	1900
маса машини, кг	1500	1500	1822	300	1850

Аналіз таблиці 1 показує, що сучасні машини (LF-200-S, ETM205, HUT205, WAW), маючи схожі з Р-20 силові параметри (навантаження 200 кН), кардинально відрізняються системами керування. Вони поєднують надійну гідравлічну силову частину з сучасними цифровими контролерами, тензометричними датчиками сили та комп'ютерним управлінням процесом. Це доводить, що сам по собі гідравлічний принцип створення навантаження залишається актуальним, але вимагає сучасної системи управління.

Висновки. Проведений аналіз конструкцій та ринку випробувальних машин дозволяє зробити наступні висновки:

- Існує велика різноманітність випробувальних машин, серед яких поширеними залишаються універсальні електрогідравлічні системи.
- Наявний в українських лабораторіях парк машин типу Р-20 має фундаментальну перевагу – надійну та довговічну силову раму, але водночас повністю застарілі системи управління та вимірювання.
- Сучасні закордонні аналоги (LF-200-S, HUT205 та ін.) демонструють ефективне поєднання класичної гідравлічної силової схеми з новітніми цифровими системами керування та реєстрації даних.
- Порівнюючи високу вартість придбання нових машин та значний ресурс існуючих, найбільш економічно обґрунтованим та раціональним рішенням є **глибока модернізація** наявного парку машин типу Р-20.

Перспективи подальшої роботи. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку конкретного проєкту модернізації машини Р-20, що включатиме заміну гідравлічного силовимірювача на сучасний тензодатчик, встановлення датчика переміщення траверси та розробку комп’ютерно-інтегрованої системи керування на базі ПК для автоматизації процесу випробування та цифрової обробки результатів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Розривна машина. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Розривна_машина
2. ДСТУ EN ISO 6892-1:2022 Металеві матеріали. Випробування на розтягування. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN ISO 6892-1:2019, IDT; ISO 6892-1:2019, IDT). [Чинний від 2023-12-31]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 57 с.
3. 200 kN Servohydraulic Testing Machine with Hydraulic Used and Digital Controler Type LF-200-S. URL: https://www.walterbai.com/page/products/Used_Machines/Type_LF-200-S.php
4. Універсальна дослідницька машина ETM-D. URL: https://thermolab.com.ua/product/universalnaa-ispytatelnaa-masina-etmd
5. HUT-A series. URL: http://www.wance.net/products/yeyawanneng/weikongdianye2/ac2c3e2c-d56e-42d1-855e-222e4947e227.html
6. 200kn Electro-Hydraulic Servo Universal Testing Machine. URL: https://shenlitest.en.made-in-china.com/product/BKvJXAePbxUM/China-200kn-Electro-Hydraulic-Servo-Universal-Testing-Machine.html
7. ДСТУ OHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. [Чинний від 2015-06-22]. Київ, 2016. 53 ст.
8. ДБН В.2.5-28-2006. Інженерне обладнання будинків і споруд. ПРИРОДНЕ І ШТУЧНЕ ОСВІТЛЕННЯ. [Чинний від 2006-05-15]. Київ, 2006. 96 ст.

СЕКЦІЯ «АВТОМАТИКА В ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ»

УДК 681.518
Герман Б. А., Бартошик О. В., Цюпящук Я. В.
Луцький національний технічний університет
E-mail: s.moroz@lntu.edu.ua

ДИСТАНЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ СИГНАЛІЗАЦІЄЮ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДУЛЯ GSM

В даній роботі зроблений огляд функціональних особливостей модуля GSM/GPRS Shield на базі SIM900/800. Розглянуті особливості архітектури та принципи роботи GSM-сигналізацій; сформовано вимоги до побудови охоронної системи, що використовує GSM-модуль; запропоновано структурну схему та методику реалізації дистанційного керування сигналізацією. Зроблені висновки щодо ефективності реалізації функцій дистанційного керування та моніторингу в системах охорони, автоматики та інтернету речей.
Ключові слова: дистанційне керування, GSM/GPRS Shield, SIM900/800, передавання данних.

B. Herman, O. V. Bartoshik, Ya. Tsyupyashchuk, Remote control of alarm system using a GSM module. This paper reviews the functional features of the GSM/GPRS Shield module based on SIM900/800. The architectural features and principles of GSM signaling are considered; requirements for building a security system using a GSM module are formulated; a structural diagram and a methodology for implementing remote signaling are proposed. Conclusions are drawn regarding the effectiveness of implementing remote control and monitoring functions in security, automation, and Internet of Things systems.
Keywords: remote control, GSM/GPRS Shield, SIM900/800, data transmission.

Постановка проблеми.

Зростання кількості об’єктів, що потребують постійного моніторингу та охорони, висуває вимоги до створення надійних і доступних систем дистанційного керування охоронними пристроями. Традиційні дротові та локальні бездротові системи сигналізації мають обмежений радіус дії, залежать від стабільності локальної інфраструктури та часто не забезпечують оперативного інформування користувача у разі спрацювання датчиків.

З розвитком мобільних мереж технології GSM стали одним із найефективніших засобів забезпечення віддаленого керування охоронними системами. Зокрема, модулі покоління GSM 900/800 надають можливість передавати повідомлення, здійснювати виклики та приймати команди незалежно від географічного розташування користувача.

Попри доступність GSM-модулів, у практиці проєктування охоронних систем залишається низка невирішених інженерних завдань: забезпечення стабільності каналу зв'язку, мінімізація затримки передачі команд, оптимізація енергоспоживання, захист від несанкціонованого доступу, а також інтеграція GSM-модуля з мікроконтролерними платформами та датчиками охоронної системи.

Отже, актуальною є проблема розроблення та дослідження системи дистанційного керування сигналізацією на базі GSM 900**,** яка б забезпечувала високу надійність, універсальність, низьку вартість обслуговування та можливість масштабування для різних типів об’єктів.

Огляд актуальних досліджень з проблеми.

Аналіз літературних джерел [1, 2] присвячених розвитку охоронних систем, свідчить про систематичне вдосконалення технічних засобів безпеки та поступовий перехід від традиційних охоронних підходів до інтегрованих, автоматизованих та дистанційно керованих систем. У дослідженнях підкреслюється, що надійність охорони об’єктів дедалі більше залежить від застосування інноваційних електронних компонентів, здатних здійснювати моніторинг і передачу тривожних сповіщень без участі людини. Особливої актуальності ця тенденція набула з розвитком бездротових технологій мобільного зв’язку.

У науково-технічних джерелах [3-5] розглядається широкий спектр охоронних систем: від традиційних централізованих комплексів, що функціонують у взаємодії з воєнізованою охороною, до інтелектуальних систем типу «розумного дому» та комбінованих рішень із використанням відеоспостереження, датчиків руху та контролю доступу. Такі системи забезпечують комплексний

підхід до захисту об’єктів, однак характеризуються високою вартістю розгортання та експлуатації.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділено GSM-сигналізаціям як перспективному напрямку розвитку охоронних технологій. Розвиток стільникових мереж та зниження вартості мобільних модулів сприяли появі багатофункціональних GSM-пристроїв, що стали складовою професійних охоронних комплексів, систем моніторингу транспорту та побутових систем безпеки. GSM-технології забезпечують передавання тривожних сповіщень у вигляді SMS або голосових викликів, а також надають можливість дистанційного керування електронними пристроями на об’єкті.

Публікації підкреслюють, що значний інтерес викликають дослідження стійкості GSM-систем до навмисних завад (глушіння сигналу), оскільки саме цей фактор є одним із ключових ризиків для бездротових охоронних комплексів. Також аналізується роль резервування каналів зв’язку (дві-три SIM-карти, альтернативні канали передачі даних), що дозволяє підвищити надійність сповіщення.

Проведені дослідження свідчать, що GSM-сигналізації набули широкого застосування завдяки низькій вартості, простоті встановлення, універсальності та здатності працювати на значній відстані від об’єкта. Водночас автори акцентують увагу на їхній обмеженій ефективності порівняно з професійними радіоканальними або комплексними охоронними системами, особливо у випадках відсутності стабільного покриття мобільної мережі.

Таким чином, аналіз актуальних джерел підтверджує, що впровадження GSM-модулів у системи охоронної сигналізації є актуальним і перспективним напряком досліджень, який поєднує доступність, функціональність та можливості дистанційного керування. Разом із тим, питання підвищення стійкості до завад, оптимізації енергоспоживання та покращення інтеграції з іншими засобами охорони залишаються відкритими й потребують подальшого науково-технічного розвитку.

Формулювання цілей статті.

Метою статті є обґрунтування доцільності використання GSM-технологій у системах охоронної сигналізації та розроблення підходів до реалізації дистанційного керування охоронними пристроями на основі GSM-модуля. Для досягнення поставленої мети потрібно проаналізувати існуючі підходи та технічні засоби, що застосовуються в сучасних охоронних системах; визначити особливості архітектури та принципи роботи GSM-сигналізацій; сформувати вимоги до побудови охоронної системи, що використовує GSM-модуль як основний або резервний канал зв’язку; запропонувати структурну схему та методику реалізації дистанційного керування сигналізацією, яка забезпечує достатній рівень надійності, інформативності та автономності роботи.

Основна частина.

Одним з варіантів дистанційного керування сигналізацією є використання спеціалізованих модулів GSM 900/800. Модуль GSM/GPRS Shield на базі SIM900/800 призначений для функціонування у мережах стільникового зв’язку стандартів GSM та GPRS і орієнтований на застосування в системах автоматики, моніторингу та дистанційного керування. Взаємодія з мікроконтролерними платформами, зокрема Arduino, здійснюється через інтерфейс UART, що забезпечує сумісність із широким спектром електронних пристроїв. Програмне управління модулем базується на використанні стандартного набору AT-команд, що значно спрощує інтеграцію модуля у вбудовані системи [6-8].

Конструктивно модуль оснащений роз’ємами для підключення зовнішньої антени, мікрофона та навушників, а також тримачем батареї CR1220 для підтримання роботи внутрішнього годинника реального часу (RTC). Крім комунікаційних можливостей, плата SIM900 має 12 універсальних цифрових входів/виходів (GPIO), інтерфейси PWM та ADC, що дозволяє використовувати її як елемент багатофункціональних IoT-систем (рисунок 1).

Плата розширення SIM900/800 виконує функції повноцінного GSM-модему і може реалізовувати більшість функцій звичайного мобільного телефону, включно з передаванням SMS-повідомлень, встановленням голосових з’єднань та обміном даними через GPRS з підтримкою протоколів TCP/IP. Наявність чотиридіапазонної підтримки (850/900/1800/1900 МГц) забезпечує працездатність модуля практично в будь-якому регіоні світу.

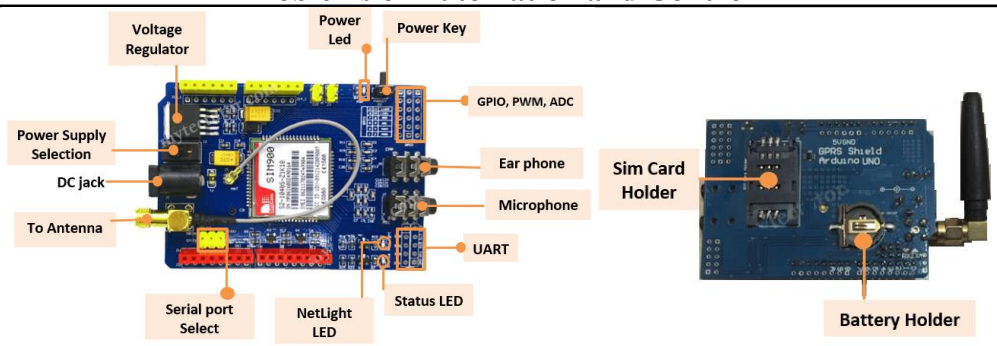


Рисунок 1 – Модуль GSM/GPRS Shield на базі SIM900/800 [6]

Для індикації стану роботи передбачено три світлодіоди: PWR – індикація наявності живлення; Status – індикація активності мікросхеми SIM900; Netlight – індикація стану підключення до стільникової мережі з різними режимами блимання, що відображають реєстрацію в мережі, очікування, активацію GPRS-сеансу тощо.

Однією з ключових вимог до коректної роботи GSM/GPRS модуля є забезпечення його стабільним живленням. Під час передавання даних модуль SIM900 може споживати струм до 2 А, тому використання зовнішнього джерела живлення є обов'язковим. Підключення здійснюється через стандартний роз'єм 5,5 мм, із можливістю вибору джерела живлення повзунковим перемикачем. Діапазон робочої напруги становить 5-9 В, а джерело живлення повинно забезпечувати достатній піковий струм.

Передавання даних між GSM Shield та Arduino здійснюється через інтерфейс UART зі швидкістю 1200–115200 біт/с із підтримкою автоматичного визначення швидкості. Перемичками на платі можна вибрати, які пінові лінії Arduino використовуватимуться: апаратний UART (D0, D1) або програмний послідовний порт (D7, D8) (рисунок 2). Така гнучкість дозволяє оптимізувати роботу системи залежно від використовуваної мікроконтролерної плати.

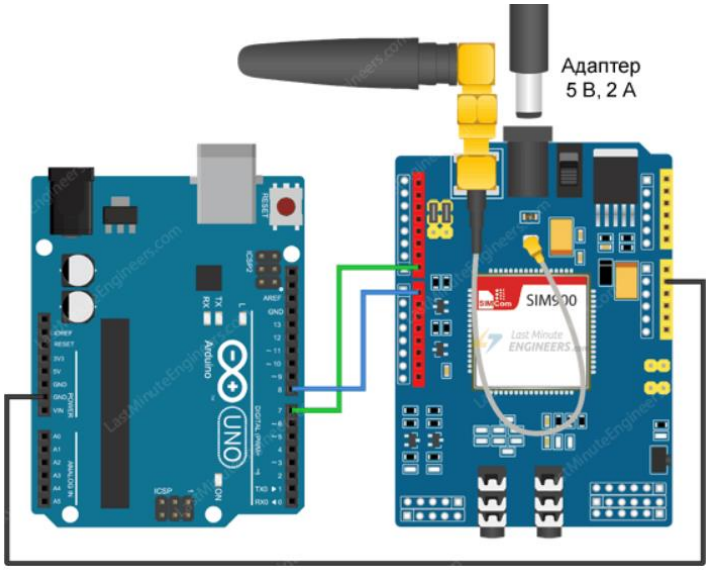


Рисунок 2 – Схема підключення модуля до плати Arduino [7]

SIM900/800 не лише передає дані, але й забезпечує обробку аудіосигналів. Плата обладнана двома роз'ємами 3,5 мм — для мікрофона та навушників. Завдяки підтримці стандартних аудіокодеків (HR, FR, EFR, AMR) реалізується можливість здійснення та прийому голосових дзвінків, а також прослуховування FM-радіо. Підтримуються стандартні електретні мікрофони та гарнітури, сумісні з мобільними телефонами.

На платі передбачено два типи антенних роз'ємів — U.FL та SMA, з'єднаних між собою через патч-кабель. У комплекті постачається зовнішня GSM-антена підсиленням 3 дБі, що забезпечує впевнений рівень сигналу навіть при монтажі плати всередині металевого корпусу.

Для встановлення SIM-картки використовується стандартний повнорозмірний слот,

розташований на зворотній стороні плати. Активована SIM-карта забезпечує доступ до мережевих сервісів, що необхідно для передачі SMS, здійснення викликів та обміну даними.

Модуль SIM900/800 може працювати як автономний годинник реального часу. Функція RTC зберігає час навіть при відсутності основного живлення, за умови встановлення батареї CR1220. Синхронізація часу може виконуватися як оператором мережі, так і вручну за допомогою AT-команди AT+CCLK.

Для запуску GSM/GPRS Shield у системі Arduino необхідно виконати декілька підключень. Зокрема з'єднати TX і RX плати зі штирями D7 і D8 контролера; підключити зовнішнє живлення; об'єднати усі точки "землі"; встановити SIM-картку та підключити антену.

Увімкнення модуля здійснюється за допомогою апаратної кнопки або програмно через подання низького рівня на вивід PWRKEY. Для програмного керування необхідно активувати перемичку R13 та підключити відповідний вихід Arduino.

Програмно-апаратні ресурси SIM900/800 досить добре розвинені, завдяки чому звичний функціонал GSM-модуля має наступні програмні можливості: GSM Location – визначення координат розташування за інформацією про базові станції; SSL – протокол захищених сокетів для забезпечення безпечної передачі даних через мережу; MMS – протокол мультимедійних повідомлень; Jamming Detection – детектування факту «глушіння» GSM-каналу; DTMF decoder – декодування DTMF-тонів; EMAIL – поштовий протокол передачі електронних листів; SMS Autorun – керування роботою модуля за допомогою SMS; PING – функція запиту «відлуння» через Інтернет для перевірки доступності одержувача; AMR Play – функція відтворення аудіо-файлів в динамік або у бік віддаленого абонента під час активного голосового з'єднання; 5MB User Memory – вбудована в модуль пам'ять для даних користувача; Easy Scan – функція отримання інформації про навколишні базові станції без підключення SIM-картки. Застосування цих додаткових функцій може не лише принести економічну вигоду, а й принципово удосконалити споживчі якості кінцевого обладнання GSM

Висновки.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що модуль GSM/GPRS Shield на базі SIM900 є ефективним засобом для реалізації функцій дистанційного керування та моніторингу в системах охорони, автоматики та інтернету речей. Завдяки підтримці стандартів GSM та GPRS, наявності вбудованих стеків TCP/IP, UDP, а також можливості роботи з AT-командами, модуль забезпечує широкі можливості для уніфікованого передавання даних та взаємодії з мікроконтролерними системами, зокрема платформою Arduino.

Конструктивні особливості модуля, включно з наявністю роз'ємів для підключення антени, аудіопристроїв, батареї RTC та SIM-картки, роблять його універсальним рішенням для створення автономних та енергонезалежних систем зв'язку. Забезпечення достатнього рівня живлення та коректного підключення дозволяє стабільно використовувати SIM900/800 у режимах голосового зв'язку, передавання SMS та роботи із GPRS-каналом.

Дослідження показує, що SIM900/800 має оптимальне співвідношення функціональності, надійності та вартості, що робить його доцільним вибором для побудови систем дистанційного керування сигналізацією. З огляду на простоту інтеграції, гнучкість налаштування та наявність широкої підтримки програмних інструментів, модуль залишається одним із найпоширеніших GSM-рішень для практичного застосування в освітніх, наукових та інженерних проєктах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мельник, В. П., Кравчук, В. С. Інженерно-технічні засоби охорони: навчальний посібник. Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2016. 256 с.

2. Петрович, О. І., Гаврилюк, Ю. В. Охоронні системи та технічні засоби безпеки: навчальний посібник. Київ: НАУ, 2019. 312 с.

3.Sandia National Laboratories. Physical Security Systems and Equipment. U.S. Department of Energy, 2015. 212 p.

4. Бровко, А. О., Вознюк, С. М. Розвиток технічних засобів охорони в контексті сучасних викликів безпеки // Право і безпека. 2020. № 4. С. 72–79

5. Fischer, R. J., Halibozek, E. P., Walters, D. C. Introduction to Security. 10th ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2019. 688 p.

6. SIM900 GSM/GPRS Shield with Arduino. URL: https://mytectutor.com/sim900-gsm-gprs-shield-with-arduino/ (дата звернення 19.11.2025).

7. GPRS Shield V1.0. URL: https://seeeddoc.github.io/GPRS_Shield_V1.0/ (дата звернення 19.11.2025).

8. SIM800 Series_AT Command Manual_V1.09 URL: https://www.faranux.com/wp-content/uploads/2016/12/SIM800-Series_AT-Command-Manual_V1.09.pdf (дата звернення 19.11.2025).

УДК 621.3:004.451.2:621.316.9

Євсюк М. М., Ковалюк Н. В.
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНОГО ТЕРМІНАЛУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ СИСТЕМАМИ ВУЛИЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ

У роботі представлено розроблення мікроконтролерного терміналу для автоматизованого керування системами вуличного освітлення, спрямованого на підвищення енергоефективності, безпеки та надійності електричних мереж зовнішнього освітлення. Проаналізовано недоліки традиційних електромеханічних шаф керування, що не забезпечують гнучкої логіки роботи та засобів телеметрії, що ускладнює їх використання в сучасних інфраструктурних умовах. Запропонований підхід базується на застосуванні мікроконтролера ATmega 2560 PRO та платформи Arduino Mega 2560 PRO, які завдяки розвиненим апаратним ресурсам та відкритому програмному середовищу дозволяють реалізувати функції вимірювання електричних параметрів, комутації світлових ліній, передачі інформації через GSM-канал і забезпечення автономної роботи під час аварійних відключень. Окрему увагу приділено структурі терміналу, вибору датвачів напруги та струму, засобів резервного живлення та особливостям інтеграції модулів зв'язку.

Ключові слова: керування вуличним освітленням; мікроконтролерний термінал; ATmega 2560 PRO; Arduino Mega 2560; моніторинг електричних параметрів; давачі напруги і струму; GSM-зв'язок; автоматизація; енергоефективність; технології «розумного міста».

Yevsyuk M., Kovaliuk N. Development of a microcontroller terminal for automated control of street lighting systems. The article presents the development of a microcontroller-based terminal designed for automated control of street lighting systems, aimed at improving energy efficiency, operational safety, and the reliability of outdoor electrical networks. The limitations of traditional electromechanical control cabinets, which lack programmable logic, telemetry capabilities, and flexible monitoring functions, are analyzed. The proposed solution utilizes the ATmega 2560 PRO microcontroller together with the Arduino Mega 2560 PRO platform, which, due to their advanced hardware resources and open-source development environment, enable the implementation of voltage and current measurement, switching of lighting lines, GSM-based data transmission, and autonomous operation during power outages. Special attention is given to the architectural structure of the terminal, the selection of voltage and current sensors, backup power modules, and the integration of communication components.

Key words: street lighting control; microcontroller terminal; ATmega 2560 PRO; Arduino Mega 2560; power monitoring; voltage and current sensors; GSM communication; automation; energy efficiency; smart city technologies.

Постановка проблеми. У сучасному світі однією з основних вимог при будівництві нових та реконструкції існуючих електричних систем освітлення є забезпечення комфорту та економії електричної енергії, підвищення безпеки та надійності в експлуатації електричних мереж освітлення. Якісні та надійні освітлювальні пристрої забезпечують безпеку на вулицях, парках та дворах, значно знижується ризик дорожньо-транспортних пригод. Забезпечення комфорту в керуванні та економії електричної енергії, підвищення безпеки та надійності в експлуатації електричних мереж освітлення забезпечується за допомогою автоматизованого терміналу управління вуличним освітленням. Це електронні пристрої, що забезпечують централізоване або локальне керування мережею зовнішнього освітлення. Застарілі термінали, які ще застосовуються для вуличного освітлення – це електромеханічні шафи керування, які забезпечують базові функції комутації ліній освітлення без застосування програмованої логіки або електронних контролерів. Робота таких терміналів базується на використанні електромагнітних реле, контакторів, фотореле

та механічних таймерів. Тобто це ті системи, які працювали без мікропроцесорних блоків, без телеметрії, без програмування – їхня логіка була повністю електромеханічною або релейною [1].

Аналіз останніх досліджень. Сучасна система вуличного освітлення містить розгалужену структуру та багато центрів живлення освітлювальних мереж. В таких мережах необхідно використовувати складніші, інноваційно-досконаліші автоматизовані системи вуличного освітлення з дистанційним управлінням.

Сучасні освітлювальні термінали – це мультифункціональні електронні пристрої із повним набором функцій: збору інформації про стан мережі та її параметри; контролю ввімкнення і відключення мережі та монітор стану; забезпечення ручного та автоматичного керування системою; забезпечення управління групами відхідних ліній; дистанційна передача даних на монітор диспетчерського управління; інтегрування в систему традиційних давачів освітленості, руху та інших сенсорів.

Таким чином, можна зробити висновок у потребі побудови автоматизованих систем керування освітленням, що дозволяють не лише комутувати освітлення вулиць, але й регулювати енергоспоживання системи, контролювати цілісність устаткування й несанкціонований доступ, вчасно сигналізувати оперативному персоналу про аварійні ситуації в мережі.

Мета роботи. Розроблення мікроконтролерного терміналу для автоматизованого керування системами вуличного освітлення, що забезпечує вимірювання електричних параметрів, комутацію освітлювальних ліній, передачу даних через GSM-канал та автономну роботу під час відключення живлення.

Викладення основного матеріалу. Одним із рішень створення сучасної автоматизованої системи управління вуличним освітленням є побудова терміналу на базі мікроконтролера. Реалізація системи автоматизованого управління вуличним освітленням полягає в використанні мікроконтролера типу ATmega 2560 PRO. Виробником мікроконтролера є компанія Microchip technology. Як відомо з [2], мікроконтролер ATmega 2560 PRO – це 8-ми бітний КМОП-мікроконтролер на базі AVR. Його основною перевагою є здатність виконувати складні логічні алгоритми за один тактовий цикл та досягати пропускної здатності до 16 мільйонів інструкцій за тактової частоти 16МГц. Його застосовують для створення складних систем завдяки великій кількості входів та виходів, що є зручним для підключення значної кількості сенсорів та давачів.

Аналіз функціональних можливостей даного AVR контролера характеризує великий набір інструкцій з 32 робочими регістрами загального призначення, які безпосередньо підключені до арифметично-логічного пристрою, що дозволяє отримувати доступ до двох незалежних регістрів за допомогою однієї інструкції за один такт. Така архітектура є досить ефективною для кодування, досягаючи при цьому пропускної здатності до десяти разів швидшої, ніж у звичайних CISC-контролерів.

Мікроконтролер виготовлено з використанням технології енергонезалежної пам’яті високої щільності Atmel. Завдяки обсягу флеш пам’яті у 256 кБ можна досягнути високої швидкодії при роботі з великими обсягами інформації. Вбудована флеш-пам’ять ISP дозволяє перепрограмувати програмну пам’ять в системі через послідовний інтерфейс SPI звичайним програматором енергонезалежної пам’яті або вбудованою програмою завантаження, що працює на базі AVR.

Одним з факторів гнучкості ATmega є простота та великий набір інструментів розробки програм та систем, включаючи: компілятори C, макроасемблери, симулятори програм, внутрішньосхемні емулятори та комплекти для оцінки [3].

Для зручності побудови проекту на основі ATmega 2560 доцільно використовувати вже готові платформи для розробки Arduino. Така плата оснащена USB конектором, стабілізаторами напруги на 3,3 та 5В, кварцевим резонатором 16МГц [3].

За допомогою модульної плати Arduino Mega 2560 PRO є можливість виконати побудову терміналу управління вуличним освітленням. Одним з основних критеріїв вибору є відкрите програмне забезпечення, яке може працювати на Windows, Linux та OSX. На відміну від інших подібних систем, що здатні працювати лише на Windows. Окрім цього, середовище програмування Arduino з відкритим кодом дає змогу інженерам та програмістам вносити свої зміни, розширити можливості за допомогою C++ бібліотек.

Arduino Mega 2560 надає також ряд можливостей для здійснення зв’язку з ПК або планшетом, ще одним Arduino або іншими мікроконтролерами. Для цього в ATmega 2560 є чотири апаратних приймачі UART, які забезпечують реалізацію послідовних інтерфейсів (логічним рівнем TTL 5В). Мікроконтролер ATmega16U2 (або ATmega8U2 на платах версії R1 і R2) забезпечує зв’язок одного з приймачів з USB-портом комп’ютера, і при підключенні до ПК дозволяє Arduino визначатися як

віртуальний COM-порт (для цього операційній системі Windows потрібно відповідний .inf-файл, на відміну від OSX і Linux, де розпізнавання плати в якості COM-порту відбувається автоматично). У пакет програмного забезпечення Arduino входить спеціальна програма SerialMonitor, що дозволяє зчитувати і відправляти на Arduino необхідні текстові дані [4].

Таким чином апаратна платформа Arduino є хорошим інструментом для побудови проекту терміналу. Це досягається можливістю використовувати готові бібліотеки для роботи давачів напруги та струму, виконувати передачу інформації через канал GSM, підключення виконавчих реле для управління контакторами на лінійних фідерах.

Розроблений термінал автоматизованого вуличного освітлення представлено на рисунку 1.

Основними компонентами терміналу управління системою вуличного освітленням є:

1. Мікроконтролер типу ATmega 2560 PRO.

2. Вимірювальні пристрої. Для зняття параметрів з фідерів мережі вуличного освітлення та в подальшому розрахунку споживання електроенергії є необхідність застосування давачів напруги та струму. Вимірювання напруги електричної мережі реалізовується за допомогою понижувальних трансформаторів напруги, які понижують напругу мережі до зручного для мікроконтролера значення. Вимірювання сили струму мережі здійснюється безконтактними трансформаторами струму, які зможуть безпечно та зручно виконувати вимірювання сили струму і перетворювати значення струму в зручні значення для подальшої обробки мікроконтролером. Давач струму SCT-013-000 дозволяє вимірювати силу струму (до 30А) яка проходить по дротах без прямого підключення до них (провід укладається в магнітний сердечник датчика). За допомогою цього давача можна виміряти дійсний рівень використовуваної різними приладами електроенергії, будувати системи оповіщення про включене навантаження та інше [5].



Рис. 1. Термінал управління вуличним освітленням на базі мікроконтролера типу ATmega 2560 PRO

3. Модуль зв’язку. Передача сигналів інформації від мікроконтролера до диспетчера виконується за допомогою GSM модуля SIM800 [6]. Даний модуль дозволяє здійснювати голосові дзвінки, надсилати SMS-повідомлення. Крім GSM та GPRS, модуль так само підтримує Bluetooth версії 3.0 та протоколи POP3, SMTP, MMS, FTP, HTTP, SSL [6].

4. Система електрозабезпечення. Живлення терміналу відбувається від мережі 220В, але для забезпечення автономної роботи під час планових або аварійних відключень електроенергії, живлення забезпечується від двох джерел. Резервним живленням є акумулятор для підтримки автономного живлення пристрою протягом 5 годин. Для збереження базових налаштувань мікроконтролера та годинника реального часу передбачена батарея CR2032, яка забезпечує збереження часу та налаштувань навіть при повному відключенні основного живлення на тривалий період.

5. З’єднувальні елементи. З’єднання електричної схеми терміналу з електричними частинами освітлювальної шафи виконані гнучким монтажним проводом з ізоляцією, розрахованою на напругу 0,4 кВ, зібраним в монтажні джгути. Для підключення джгута з провідниками до терміналу використовуються стандартні роз’єми для оперативної заміни терміналу в разі потреби.

Термінал управління вуличним освітленням передбачає дискретні виходи для комутації виконавчих пристроїв, таких як магнітні контактори електричних мереж освітлення.

Висновки. Запропонований варіант побудови терміналу управління вуличним освітленням на базі мікроконтролера ATmega 2560 PRO, забезпечує реалізацію ключових функцій сучасного

вуличного освітлення, включаючи: вимірювання параметрів електричної мережі; передачу інформації через GSM-модуль SIM800; комутацію світлових ліній через виконавчі реле та контактори; підтримку автономної роботи завдяки резервному живленню. Практична реалізація такого терміналу підтверджує можливість заміни застарілих релейних систем сучасними мікроконтролерними рішеннями, які забезпечують точніший контроль, економію електроенергії, підвищення надійності роботи та оперативне реагування на аварійні ситуації. Отримані результати мають практичну значущість, оскільки можуть бути використані в комунальному господарстві, при модернізації існуючих мереж зовнішнього освітлення, а також як основа для побудови більш складних систем «розумного міста».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ляхович О. Л. Проблеми створення й реалізації датчиків освітленості й застосування їх в освітлювальних установках зовнішнього освітлення URL: https://lepe.kname.edu.ua/index.php/lepe/uk/article/download/342/337/674.

2. ARDUINO ATMEGA 2560-16AU R3 CH340 URL: https://radio-magazin.com.ua/arduino-atmega-2560-16au-r3-ch340

3. Arduino Mega2560 Pro ATmega2560-16AU URL: https://arduinka.biz.ua/arduino-Mega2560-pro-atmega2560-16au-p852c20.html

4. Arduino Mega 2560 Rev3 / A000067 URL: https://evo.net.ua/ru/arduino-mega-2560-rev3/?srsltid=AfmBOooAoTl8jrEthff0diyprPl-j_Fe5Mjuwa1BLDUobxDS2poGccI0

5. Неінвазивний давач змінного струму SCT-013-030 (30A) URL: https://arduino.ua/prod245-neinvazivnii-datchik-peremennogo-toka-sct-013-030-30a-max?srsltid= AfmBOoo2Bbb5KrKjJC1avgQtzwODmmDAfVwGId1ew2aQAP014tiJPDna (дата звернення 09.11.2025р.)

6. Модуль зв'язку SIM800C GSM GPRS з Bluetooth UART TTL URL: https://detalipro.in.ua/modul-zvjazku-sim800s-gsm-gprs-s-bluetooth-diymore-diymore?gclid=CjwKCAiAlMHIBhAcEiwAZhZBUijIPNp203OGOTjjO8CHhfHPPfAb-T5WSEI1sG8i3MJ2arvw6CxG6BoCa-EQAvD_BwE

УДК 621.3:004.451.2:621.316.9

Заблоцький В. Ю., Гикавий С. В.
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

У роботі розроблено систему відеоспостереження за площами промислового підприємства з урахуванням особливостей використовуваного обладнання залежно від характеристик кутів огляду камер, площ, за якими ведеться відеоспостереження. Розраховано кількість камер для забезпечення спостереження. Проведено розрахунок фокусної відстані. Розроблено схематичний план системи відеоспостереження, а також розглянуто особливості підключення елементів такої системи та підключення елементів до сервера системи. За результатами дослідження розроблено схему розташування камер для підприємства.

Ключові слова: відеоспостереження, система відео нагляду, технології «розумного міста», ip-адресація, відеокамера IPC-HDW4231EMP-AS

Zablotskyi V., Hykavyi S. Development of a video surveillance system for an industrial enterprise. The work developed a video surveillance system for the areas of an industrial enterprise, taking into account the features of the equipment used, depending on the characteristics of the viewing angles of the cameras, the areas over which video surveillance is conducted. The number of cameras to ensure surveillance was calculated. The focal length was calculated. A schematic plan of the video surveillance system was developed, and the features of connecting the elements of such a system and connecting the elements to the system server were also considered. Based on the results of the study, a camera location scheme for the enterprise was developed.

Keywords: video surveillance, video surveillance system, "smart city" technologies, IP addressing, IPC-HDW4231EMP-AS video camera

Постановка проблеми. В сучасному світі не можливим є облаштування організацій, підприємств, заводів або магазинів, в яких немає «систем відеоспостереження». Сьогодні складно знайти підприємство чи будь яку іншу організацію без камер відеоспостереження.

Камери відеоспостереження є головним вибором обладнання для охорони різних об'єктів. Однак необхідно розуміти, що безпека об'єкта залежить від характеристик самої камери, тому важливо враховувати ряд факторів. Відеоспостереження – це невід'ємна частина сучасних систем безпеки в різних областях, таких як громадський транспорт, промисловість, комерційні будівлі, а також для домашнього використання. З розвитком нашого суспільства розвивається і злочинність, тому все більше і більше люди хочуть себе убезпечити від небажаних вторгнень і посягань на їх життя або майно. Без камер відеоспостереження в сучасному світі важко собі уявити надійну систему безпеки. Таким чином розроблення системи відео нагляду підприємства є важливою та необхідною складовою організації безпечного функціонування кожного промислового підприємства.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні камери відеоспостереження дозволяють вести спостереження, виявляти і навіть розпізнавати людину на кілька десятків метрів, а інфрачервоне підсвічування камер відеоспостереження, яка сьогодні встановлена в більшість вуличних відеокамер, дає можливість бачити що відбувається навколо навіть в абсолютній темряві.

Дуже популярним в наші дні стає проект «Безпечне місто», звдяки якому у великих містах встановлені зовнішні камери відеоспостереження прямо на вулицях і інформація з них надходить в єдиний центр безпеки, що дозволяє в подальшому здійснювати аналіз подій зафіксованих на них.

Значного поширення набули внутрішні камери відеоспостереження, які використовують в магазинах вони дозволяють стежити не тільки за крадіжкою з боку відвідувачів, але і з боку власних же працівників. Це стосується не тільки магазинів, але і будь-яких організацій та підприємств.

За допомогою відеокамер керівник підприємства може відстежити з будь-якої точки земної кулі що відбувається на підприємстві через Інтернет.

Мета роботи. Провести розрахунок теоретичних характеристик кута огляду камер відеоспостереження. Розробити схему типового плану системи відеоспостереження.

Викладення основного матеріалу. При виборі обладнання потрібно враховувати якість зйомки, деталі зображення, спосіб підключення і звичайно кут огляду камери відеоспостереження (рис. 1), завдяки якому вона зможете охоплювати більшу зону виявлення [16].

Для того щоб встановити камери потрібно приблизно оцінити яку площу вони покриють, під яким кутом її потрібно встановити для біль ефективної роботи.

Проведемо розрахунок зони огляду відеокамери IPC-HDW4231EMP-AS для здійснення відеоспостереження по всій заданій площі? Також ми визначимо кут та висоту, на якій потрібно встановити камеру для досягнення максимальної ефективності.

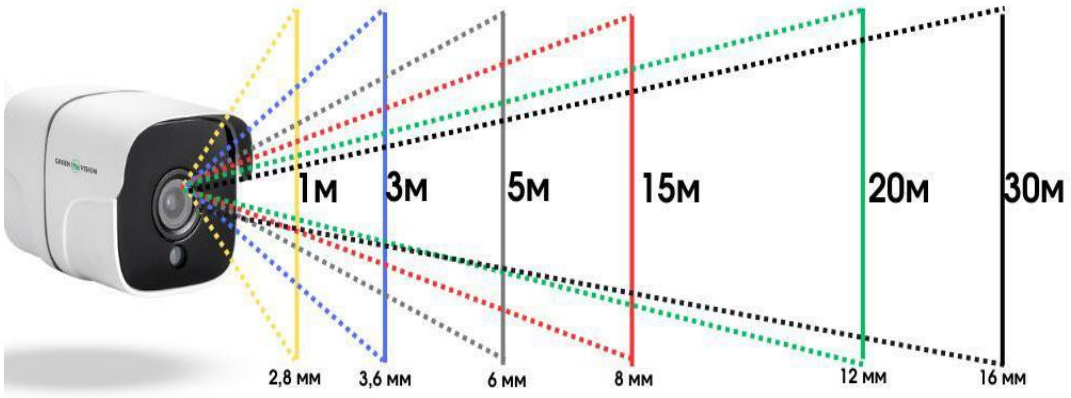


Рисунок 3.1 – Кут огляду камери відеоспостереження

Для визначення якості огляду можна використовувати різні методи. Також ця інформація міститься в технічних характеристиках обладнання, де вказано відповідні параметри і крім цього наведена в таблиці 1. Ця відстань відповідає розпізнаванню та максимальній якості під час ведення спостереження.

Таблиця 3.1 – Параметри камер відеоспостереження

f фокусна відстань об'єктива	Горизонтальний кут огляду, для ПЗС-матриць 1/3	Можливість виявлення людини	Можливість ідентифікації людини	Можливість визначення номера автомобіля
2.8 mm	86°	до 19 м	до 1.4 м.	–
2.9 mm	83°	до 20 м.	до 1.45 м.	–
3.6 mm	72°	до 25 м.	до 1.8 м.	–
4.0 mm	67°	до 28 м.	до 2 м.	до 2.6 м.
6.0 mm	48°	до 42 м.	до 3 м.	до 4 м.
8.0 mm	36°	до 56 м.	до 4 м.	до 5 м.
9.0 mm	30°	до 63 м.	до 4.5 м.	до 6 м.
12.0 mm	25°	до 84 м.	до 6 м.	до 8 м.
16.0 mm	17°	до 112 м.	до 8 м.	до 10 м.
25.0 mm	12°	до 175 м.	до 12.5 м.	до 16 м.
50.0 mm	6°	до 350 м.	до 25 м.	до 33 м.
80.0 mm	3.3°	до 560 м.	до 40 м.	до 53 м.
100.0 mm	2.8°	до 700 м.	до 50 м.	до 66 м.
120.0 mm	2.1°	до 840 м.	до 60 м.	до 80 м.

Щоб визначити оптимальний кут огляду, можна використати різні варіанти. Також можна визначити за таблицею, зазначеною вище. У ній вказується відстань, де буде ідеальний огляд. Це відстань для максимальної якості розпізнавання під час огляду.

Також фокусну відстань об'єктива можна дізнатися і самостійно, в такому випадку потрібно дізнатися кут огляду. І тут потрібно буде провести деякі розрахунки. Розрахунок фокусної відстані проводиться за формулою:

$$f = l \cdot D/L, \quad (1)$$

$$f = h \cdot D/H, \quad (2)$$

де: f – фокусна відстань об'єктива (мм);
D – відстань до об'єкта (м);
H і L − вертикальний і горизонтальний розміри об'єктива;
h і l − розміри зображення об'єктива на ПЗС − матриці.

Для коригування розміру об'єкта на екрані млонітора у формулі (3.1) для розрахунку в якості l і h беруть габарити матриці (для камер з матрицею 1/3″ h=3,6 мм, l=4,8 мм). Наприклад, нам необхідно використовувати камеру з матрицею 1/3″, в середині підприємства висота 3 м і довжиною 20 м, що віддалений на 10 метрів. Підставивши у формулу f=3,6·(100000/1300)=2,8 мм, одержимо, що для даного завдання необхідно об'єктив з фокусною відстанню не менше 2,8 мм. Звернемо увагу на те, що камери з великим форматом матриці та малою фокусною відстанню мають ширший кут огляду. При збільшення фокусної відстані формат матриці зменшується, що призводить до зменшення кута огляду.

Розрахунок кута огляду камери. Зона огляду визначається кутами огляду по горизонталі та вертикалі обернено пропорційними фокусній відстані відеокамер. Вони вказують на ефективну дистанцію відеоспостереження і впливають на ідентифікаціяю обєктів спостереження. Кожна камера відеоспостереження має свій кут огляду, який визначає, які ділянки території будуть охоплені. Цей кут огляду залежить від розміру матриці і фокусної відстані камери. Тому здатність покрити зону огляду камерою спостереження залежить під яким кутом вона встановлена, та на якій висоті. Враховуючи геометричні дані приміщення, в основному ракурс спостереження камери буде горизонтальний. Величезним плюсом у такій системі є використання камер із широким кутом огляду. Кут огляду камери визначається за формулою:

$$\alpha = 2arctg\ (\ d/2F\ ), \tag{3}$$

де α – кут огляду об'єктива (град);

d – розмір матриці (мм);

F – фокусна відстань (мм).

$$\alpha = 2arctg\ (\ 4/2{\cdot}2{,}8\ ) = 86^{\circ}$$

Провівши дані розрахунки, ми визначили, що для складання системи відеоспостереження оптимальний кут огляду камери по горизонталі становить 86˚. Вибираючи кут огляду для камери відеоспостереження, потрібно орієнтуватися на те, що він забезпечує різкість зображення в певному діапазоні, це також накладає обмеження на розмір глибини різкості зони відеоспостереження в напрямку осі відеокамери [17].

Необхідно враховувати особливості, які в кінцевому підсумку впливають на надійність системи. Крім камер відеоспостереження в систему безпеки можуть бути додані інші засоби безпеки. Відеоспостереження є частиною системи безпеки, інші виступають в якості ядра, що інтегрують всі системи, розширюють і доповнюють базову функціональність.

При розміщенні камери обов'язково враховується можливість наявності «сліпих зон», це ділянки певної зони контролю, що не охоплюються камерами. Вони можуть бути:

– статичні – споруди та конструкції, дерева, виступи стін, меблі та інше;

– динамічні – це рухомі обєкти, на передньому плані, в основному це люди та транспортні засоби, що періодично потрапляють у зону дії відеокамери.

Визначити вплив статичних обєктів не є проблемним питанням та мінімалізувати їх вплив. Передбачити ж час і місце появи динамічного об'єкта, практично неможливо. У цьому випадку доцільним може бути встановлення декількох камер відеоспостереження, що контролюють ту саму зону спостереження з різних кутів огляду.

Всі системи відеоспостереження поділяються на аналогові і цифрові, зрозуміло, що кожна з них має свої відмінності. Аналогове відеоспостереження (рис. 3.2) побудоване на підключенні по коаксіальному кабелю. Такий варіант побудови системи відеоспостереження не є ефективним і в даний час не користується попитом.

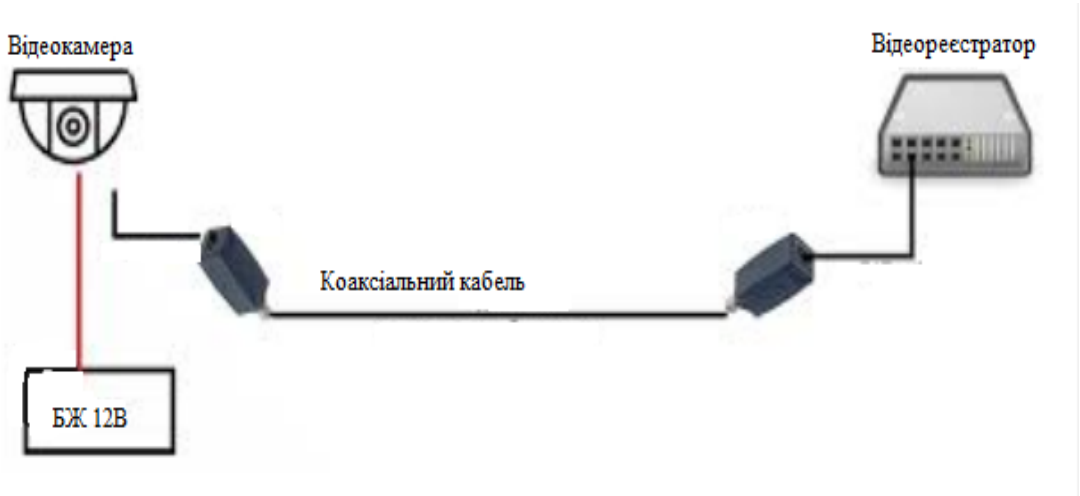


Рисунок 2 – Схематичне зображення підключення аналогової системи

Сучасне підключення до цифрової системи відеоспостереження здійснюється за допомогою кабелю вита пара, що забезпечує передачу зображення без спотворень, та знижує ризик втрати даних при передачі на великі відстані. Системи ip-відеоспостереження включають в себе камери відеоспостереження та інше обладнання, яке функціонує у єдиній системі (рис. 3).

В даній схемі комутатори приймають по периферії потік від камер відеоспостереження та живлять їх за допомогою технології POE, і після цього передають дані на центральний комутатор до якого підключаються відеосервери та робочі місця операторів [18].

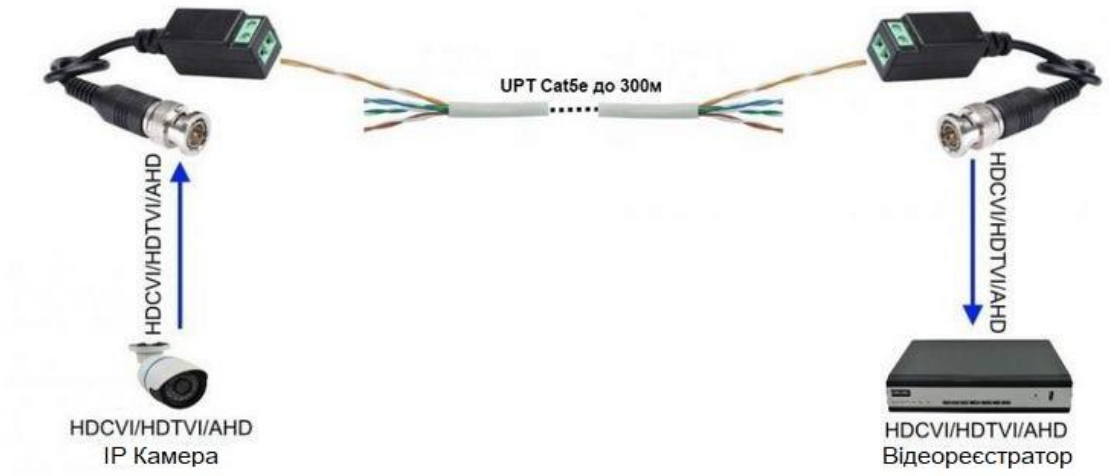


Рисунок 3 – Підключення системи відеоспостеження по витій парі

Перш ніж приступати до реалізації будь-якого проєкту системи охорони, необхідно визначитися із задачами і вимогами які має виконувати дана система, список обладнання та план-схема території та будівель, на якій будуть схематично розміщені всі пристрої майбутньої системи відеоспостереження. Це дасть можливість визначити, як камери покривають своїм радіусом дії ділянки моніторингу і чи немає в них «мертвих зон», якими можуть скористатися зловмисники та порушники.

Сервер відеоспостереження і центральний комутатор розташовується в кабінеті охорони, який облаштовується як правило в центральній частині території що охороняється. Сервер веде контроль за роботою відеокамер і обробляє відеоінформацію, що надходить. (рис. 4)



Рисунок 4 – Сервер відеоспостереження

Ip-відеоспостереження може складається із такого обладнання: ip камери відеоспостереження, IP комутатори, відеореєстратор, комп'ютер та сервер. Щоб підключити всі ip камери потрібно мережевий кабель або вита пара із подальшим підключенням до комутатора.

В даному випадку буде присутній спеціальний мережевий комутатор (маршрутизатор з великою кількістю портів), до якого є можливість підключити 16 Ip-відеокамер. При застосуванні комутатора не потрібні блоки живлення для камер, немає необхідності прокладати додаткові дроти

для живлення камер. Комутатор має вбудований грозозахист по живленню 220В і по Ethernet портам. Далі вже йде сигнал на відеореєстратор для збору і відправки даних на сервер (рис. 5) [19].

Системи ip-відеоспостереження зєднується із комп'ютером. Це пристрій використовується для передачі і отримання даних. Підключення відео сервера і відеореєстратора до комп'ютера здійснюється з використання мережевого кабелю.

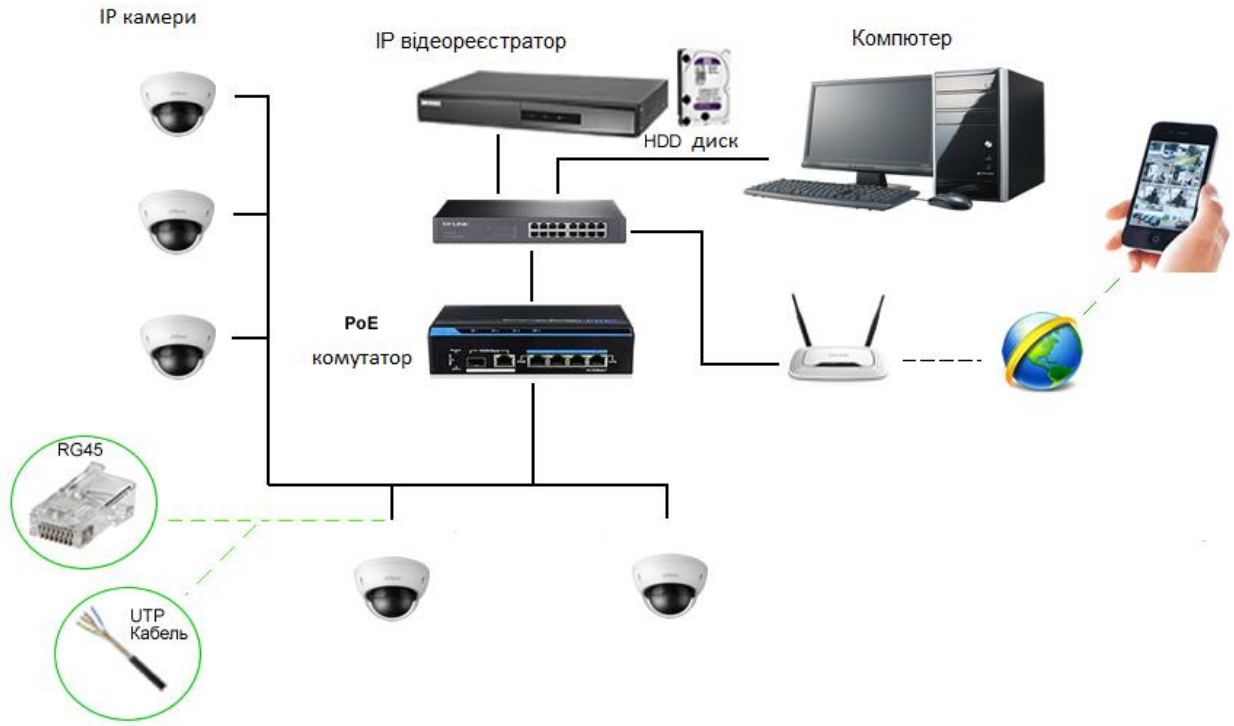


Рисунок 5 – Схема Ip-відеоспостереження

Окрім цього можливе застосування бездротового відеоспостереження з використанням ip камер відеоспостереження, що дозволяє встановити камери відеоспостереження в будь-якому зручному місці на території об'єкта (рис. 6).



Рисунок 6 – Схема бездротового відеоспостереження

Як правило типові промислові підприємства та організації забезпечуються системамою відеоспостереження (рис. 7). В такій системі відеоспостереження можливий не тільки перегляд зображення, але й зберігання даних на центральному сервері. Зараз дуже широко користується попитом бездротове відеоспостереження з використанням ip камер відеоспостереження. Нові технології роблять процес відеоспостереження простим і зручним.

При обслуговуванні такої системи необхіднезабезпечення надійної роботи мережі та безпеки інформації що в ній передається. Для автентифікації та забезпечення конфіденційності та цілісності даних, доцільніше використовувати WPA2 Enterprice, що включає до себе автентифікацію по протоколу EAP, авторизацію користувача в системі за допомогою RADIUS-сервера та забезпечує надійне стійке шифрування даних використовуючи алгоритм AES.

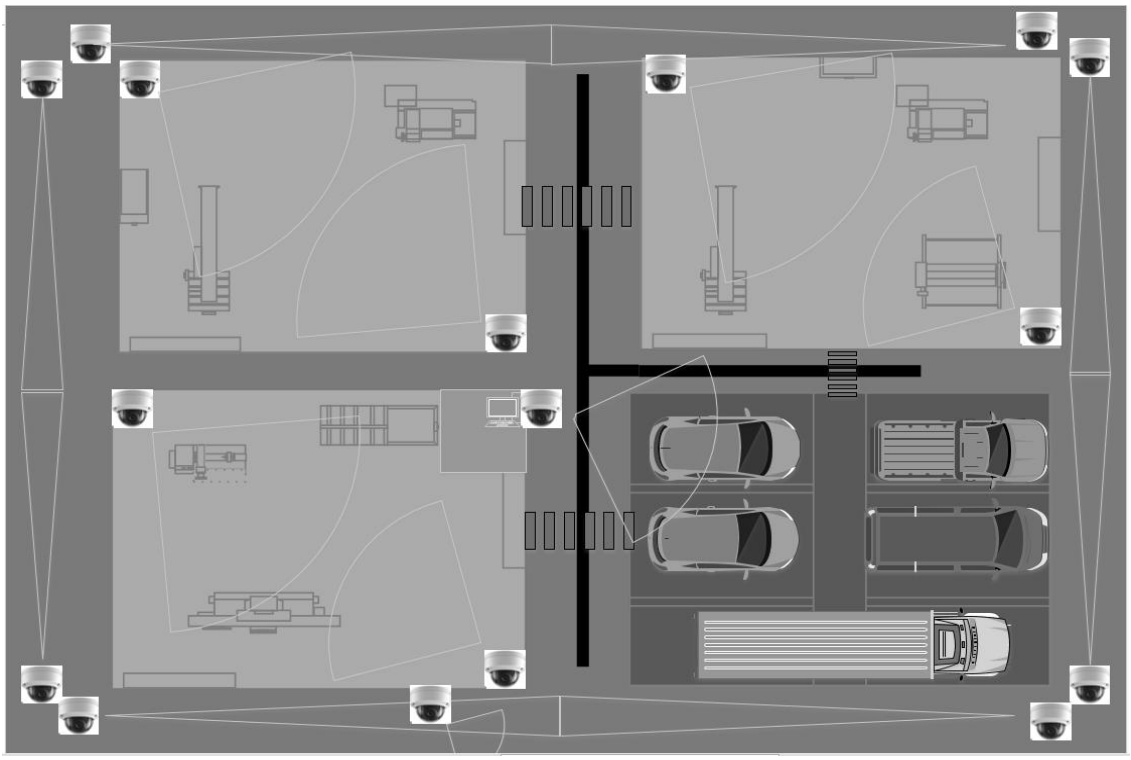


Рисунок 7 – Схема розташування камер на підприємстві.

Для корректної роботи системи відеонагляду, нам також знадобиться компьютер, відеореєстратор, монітор для перегляду записів.

Висновки. Спроектовано систему відеоспостереження для промислового підприємства з виготовлення продуктів харчування. Для реалізації поставленої мети необхідно було проаналізувати різні технології відеоспостереження та виявити їх переваги та недоліки, вибрати технологію на якій будуватиметься майбутня система, спроектувати систему відеоспостереження. Дана система відеоспостереження здебільшого контролює поведінку людей на промисловому підприємстві усередині будівлі. Камери відеоспостереження є основним вибором обладнання для охорони різних об'єктів. Однак необхідно розуміти, що безпека об'єкта залежить від характеристик самої камери, тому важливо враховувати ряд факторів, та врахувати що зона дії визначається кутами огляду по горизонталі та вертикалі обернено пропорційними фокусній відстані відеокамер. Здатність покрити зону огляду камерою спостереження залежить під яким кутом вона встановлена, та на якій висоті, тому вибираючи кут огляду для камери відеоспостереження, потрібно орієнтуватися на те, що він забезпечує різкість зображення в певному діапазоні

Камери діють як стримуючий фактор, спрямований проти зловмисників, і забезпечують безпеку життя та здоров'я її співробітників. При спробі несанкціонованого доступу до будь-якого приміщення, камери відразу зафіксують це та охорона встигне зреагувати, на дії порушника на території об'єкта, або ж розслідувати різноманітні інциденти серед персоналу. У результаті ми отримали надійну та функціональну систему відеоспостереження, що дозволяє охороняти та контролювати об'єкт, забезпечуючи безпеку персоналу та майна підприємства.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кут огляду камер відеоспостереження. Control.ua – поради та огляди від команди експертів URL:https://control.ua/ua/blog/ugol-obzora-kamer-videonablyudeniya.html (дата звернення: 31.05.2025).

2. Камери відеоспостереження: кут огляду. База будівельних матеріалів PL2T. Будматеріали оптом у Києві та області. URL: https://pl2t.com/uk/blog/post/kameri-videosposterezenna-kut-ogladu/ (дата звернення: 10.06.2025).

3. Ефективне планування вашої системи відеоспостереження. Worldvision – інтернет магазин систем безпеки. URL: https://worldvision.com.ua/articles/effektivnoe-planirovanie-vashey-sistemi-videonablyudeniya (дата звернення: 31.05.2025).

4. Принцип роботи системи відеоспостереження. Блог – Video-Standart. Интернет-магазин Video-Standart системы безопасности. URL: https://video-standart.com.ua/ua/blogh/princip-raboty-sistemy-videonabljudenija (дата звернення: 31.05.2025).

УДК 621.313

Лишук В., Денисюк К.
Луцький національний технічний університет
v.lyshuk@lntu.edu.ua

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПІВ СПЕКТРАЛЬНОГО УЩІЛЬНЕННЯ ДЛЯ ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ОПТОВОЛОКНА

У статті запропоновано принципи спектрального ущільнення в оптоволоконному кабелі. Проаналізовано паралельну передачу сигналів у волоконно-оптичних системах передачі (ВОСП). Для цих цілей використано ефект підсилення внаслідок комбінаційного розсіювання. Використано систему диференціальних рівнянь для оцінки зміни потужності оптичних несучих в багатоканальних ВОСП. Проведено розрахунки для регенераційної ділянки при зустрічному виникненні оптичних речовин для одноволоконної ВОСП. Аналіз отриманих результатів показав, що взаємодія між оптичними несучими збільшується при збільшенні потужностей на входах одномодового ОВ і зменшенні коефіцієнта затухання.

Ключові слова: оптичний канал, оптоволокно, втрати.

Lyshuk V., Denysiuk K. Application of spectral detection principles to increase the capacity of optical fiber. The article proposes the principles of spectral compression in a fiber optic cable. The parallel transmission of signals in fiber optic transmission systems (FOTS) is analyzed. For these purposes, the amplification effect due to Raman scattering is used. A system of differential equations is used to estimate the change in the power of optical carriers in multi-channel FOTS. Calculations are made for the regeneration section when optical substances occur opposite each other for a single-fiber FOTS. Analysis of the obtained results showed that the interaction between optical carriers increases with increasing powers at the inputs of a single-mode optical fiber and decreasing the attenuation coefficient.

Keywords: optical channel, optical fiber, losses.

Постановка проблеми. На сьогодні одним із найбільш перспективних методів збільшення коефіцієнта використання пропускної здатності оптоволокна (ОВ) це є спектральне ущільнення, яке є альтернативним методом просторового ущільнення. При цьому досягається значний економічний ефект для точного скорочення витрат використовуваного волокна в лінійному кабелі. Крім того, цей метод дозволяє забезпечити розгалуження мережі без проведення додаткових будівельних робіт. Також розширюються можливості передачі сигналів з різними швидкостями і типами модуляції, що забезпечує створення конкурентноспроможних багатофункціональних систем зв'язку [3].

Одним із найважливіших переваг даного методу є найбільш повне використання надширокої спектральної смуги пропускання оптоволокна. В даний час освоюється діапазон 0,8...1,8 мкм. Якщо прийняти до уваги, що ширина спектрального каналу становить 10 нм, то у вказаному діапазоні можна розмістити до 100 спектральних каналів. Наприклад, в діапазоні хвилі 1,55 мкм при десяти спектральних каналах вдалося створити ВОСП з інформаційною пропускною здатністю 1,37 Тбіт/км·1/с, що рівномірно організації по одному волокну 300000 телефонних каналів.

У ВОСП зі спектральним розподілом доцільно використовувати одномодові ОВ з малим загасанням і лазерні джерела з підвищеною потужністю випромінювання. Для забезпечення більшого енергетичного потенціалу оптичні канали слід розміщувати в одному вікні прозорості, де втрати в ОВ мінімальні. Такій вимозі, наприклад, для одномодового ОВ, виконаного на основі кварцевого скла, відповідає діапазон довжини хвилі 1,5...1,6 мкм.

Основна частина. Відносно висока густина оптичної енергії в одномодових оптичних волокнах викликає помітний прояв нелінійних ефектів. У ВОСП найбільш помітним з них є ефект підсилення внаслідок комбінаційного розсіювання (ПВКР), який зумовлений резонансною взаємодією оптично несучих з оптичними фотонами речовин ОВ. В результаті цього ефекту спостерігається взаємодія між оптичними сигналами різних оптичних каналів. Вона виражається в зменшенні оптичної потужності оптичних несучих з більшими довжинами хвиль [2].

Розглянемо випадки паралельної передачі сигналів у ВОСП. Зміна потужності оптичного сигналу в ОВ внаслідок ефекту підсилення із-за комбінаційного розсіювання у випромінюваному j-му оптичному каналі описується диференціальним рівнянням:

$$\frac{dp_j}{dz} = a_j p_j = \sum_{i=1}^{j-1} p_{ai} - \sum_{i=j+1}^{n} p_{ri},$$

де p_{jj} – потужність j-ї спектральної несучої в точці довжини хвилі ОВ (на вході ОВ z = 0); a_j - коефіцієнт потужності випромінювання на j-ї несучій; p_{ai} – приріст потужності випромінювання в і-му каналі від і-го джерела; n – число оптичних несучих; p_{pi} –передавана в і-й канал частка випромінювання j-го джерела.

В n-канальній ВОСП розподіл $P_i(z)$ потужності (i = 1...n) спектральних наявних при урахуванні ефекту підсилення комбінаційним розсіюванням може бути описано системою рівнянь:

$$\frac{dp_1}{dz} + a_1 p_1 = -\frac{q_0}{kA} p_1 \sum_{i=2}^{n} \tau_{i1} p_i,$$

$$\frac{dp_j}{dz} + a_j p_j = \frac{q_0}{rA} p_j \left(\sum_{i=1}^{j-1} \mu_{ij} \tau_{ij} p_i - \sum_{i=j+1}^{n} \tau_{ij} p_i \right),$$

$$\frac{dp_n}{dz} + a_n p_n = \frac{q_0}{kA} p \sum_{i=1}^{n-1} \mu_{in} \tau_{ij} p_i,$$

де q_0 – максимальне значення ПВКР; k – коефіцієнт поляризації ОВ; τ_{ij} – нормоване значення коефіцієнту ПВКР для і -ої несучої в j -ому каналі; $\mu_{ij} = \lambda_i / \lambda_j$.

Коефіцієнт ПВКР може бути введений в рівнянні на основі експериментальних даних або при використанні зручної апроксимації функції профілю спектральної кривої ПВКР розподілом Лоренца:

$$\tau_{ij} = \left[1 + \left(2 \frac{f_{ij} - f_{si}}{\Delta f} \right)^2 \right]^{-1},$$

де f_{ij} – частота і-го і j-го каналів; f_{si} – частота зсуву максимуму спектральноїкривої ПВКР відносно частоти і-го каналу; $f_{si} = 440$ 1/см; f – ширина профілю спектральної кривої ПВКР по рівню 0,5 (в кварцевих ОВ f = 240 1/см).

Загальну оцінку зміни потужності оптичних несучих, зумовлених ефектом ПВКР, зручно характеризувати параметром відносного співвідношення потужності в кожному оптичному каналі:

$$\Delta P = 10 lg \frac{P'(z)}{P_j(z)},$$

де $P'(z)$, $P_j(z)$ – значення потужності оптичної несучої відповідно з урахуванням і без урахування впливу ПВКР

Перехресні завади, викликані ефектом ПВКР у ВОСП, можна характеризувати умовним відношенням сигнал-шум (С-Ш):

$$C - Ш = 10 lg \frac{P_{10}(z)}{P_{10}(z) - P_1(z)},$$

де $P_{10}(z)$ – потужність оптичного сигналу в ОВ на першій несучій при відсутності ефекту ПВКР.

В цілому можна відзначити, що в одномодових ВОСП вплив ПВКР посилюється по мірі збільшення довжини ОВ та потужності випромінювання. У багатоканальних ВОСП потужність передаваного постійного сигналу в областях короткохвилевих несучих зменшується, а в областях довгохвилевих несучих збільшується [1, 4].

Розглянемо другий випадок, коли передача оптичних сигналів у ВОСП здійснюється у зворотному напрямку. Процеси поширення та взаємодії двох зустрічно поширюваних оптичних несучих можна описати у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dp_1}{dz} + a_1 p_1 = -\frac{q_0}{kA} p_1 p_2,$$

$$\frac{dp_2}{d(L-z)} + a_2 p_2 = \frac{q_0}{kA} \mu_{12} p_1 p_2,$$

де L – довжина одномодового ОВ; p_1 і p_2 – потужності зустрічних оптичних несучих.

Основні умови при зустрічній формі оптичних несучих мають вид:

$$p_1(z = 0) = P_1(0); \qquad p_2(z = L) = P_2(L),$$

де $p_1(0)$ і $p_2(0)$ – оптичні потужності, що знаходяться на протилежних входах одномодового оптоволокна.

В якості вихідного (нульового) наближення приймається стан процесу форми оптичних несучих, коли взаємодія між ними відсутня, а значення їх потужності розраховують за експоненціальним законом:

$$p_1(z) = p_1(0) \cdot e^{-a_1 z},$$

$$p_2(L - z) = p_2(L) \cdot e^{-a_2 (L-z)}.$$

Провівши математичні перетворення, отримаємо функції $p_1(z)$, $p_2(L - z)$ у вигляді:

$$p_1(z) = p_1(0) e^{-a_1 z} - \frac{q_0}{kAa_2} p_1(0) p_2(L) e^{-a_2 L} \left[e^{-(a_1 - a_2) z} - e^{-a_1 z} \right],$$

$$p_2(z) = p_2(L) e^{-a_2 (L-z)} + \frac{q_0}{kAa_1} \mu_{12} p_1(0) p_2(L) e^{-a_1 L} \left[e^{(a_1 - a_2)(L-z)} - e^{-a_2 (L-z)} \right],$$

Розрахунки проводилися для однієї регенераційної ділянки при зустрічному виникненні оптичних речовин для одноволоконної ВОСП з наступними параметрами: $a_1 = a_2 = 0{,}2$ дБ/км; $A = 0{,}000308$ м^2; $k = 2$; $q_0 = 60{,}32 \cdot 10^{-14}$ мВт; $\lambda_1 = 1{,}5$ мкм; $\lambda_2 = 1{,}6$ мкм; $L = 50$ км; $z = 25$ км; $p = 0{,}05$; 0,2; 0,26; 0,8 Дб, при потужності оптичного випромінювання 1; 10; 20; 50 мВт відповідно. При $z = L$ і при $z = 0$ $p = 0{,}1$; 0,7; 1,0; 2,0 Дб.

$$p_1(z) = 124 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0{,}24 \cdot 0{,}003} - \frac{6{,}32 \cdot 10^{-14}}{2 \cdot 0{,}24 \cdot 3{,}08 \cdot 10^{-4}} \cdot 124 \cdot 10^{-3} \cdot 10{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0{,}2 \cdot 0{,}006} \cdot \left[e^{-(0{,}24 - 0{,}20)} - e^{-0{,}24 \cdot 0{,}003} \right] = 0{,}128\, мВт.$$

$$p_2(z) = 10{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0{,}2(0{,}006 - 0{,}003)} + \frac{6{,}32 \cdot 10^{-14}}{2 \cdot 0{,}2 \cdot 3{,}08 \cdot 10^{-4}} \cdot 0{,}654 \cdot 10{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 124 \cdot 10^{-3} \cdot \left[e^{-(0{,}24 - 0{,}2)(0{,}006 - 0{,}003)} - e^{-0{,}2(0{,}006 - 0{,}003)} \right] = 0{,}0101\, мВт.$$

Аналіз отриманих результатів показує, що взаємодія між оптично несучими збільшується при збільшенні потужностей на входах одномодового ОВ і зменшенні коефіцієнта затухання. До посилення взаємодії між оптичними несучими приводять, крім того, такі фактори, як зменшення діаметра серцевини ОВ, а також ОВ, які зберігають поляризацію.

Висновки. Величина взаємодії, обумовленого ефектом ПВКР, між зустрічно поширюваними оптично несучими в більшій мірі залежить від довжини ОВ. Так, при збільшенні довжини ОВ до визначеного стану збільшується час і, відповідно, інтенсивність взаємодії оптичних несучих. Приведені результати відповідають результатам взаємодії оптичних несучих, що поширюються по ОВ в одному напрямку. Однак характер зміни величини спектрального приросту потужності різний. Причому найбільша зміна величини відносного приросту потужності для кожної оптичної несучої буде перед фотоприймальним пристроєм.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Кичак В. М. Напрямні телекомунікаційні системи : лабораторний практикум. В. : ВНТУ. 2021, 104 с.

2. Мохунь І.І., Вікторовська Ю.Ю., Галушко Ю.К. Оптичні технології в інформаційній техніці. Чернівці: Чернів. нац. ун-т. 2021, 301 с.

3. Бондарчук А.П., Срочинська Г.С., Твердохліб М.Г. Основи інфокомунікаційних технологій. К. 2021, 76 с.

4. V.I. Petrenko, Ye.N. Kosiachkin, L.A. Bulavin, M.V. Avdeev. Optimization of the initial interface configuration forin-situ neutron reflectometry experiments. J. Surf. Investigation. 2020, - P. 96-107.

УДК 681.514
Лотоцький В. І., Мельник О. В., Власик О. О.
Луцький національний технічний університет
E-mail: s.moroz@lntu.edu.ua

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ ПАЯЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

У статті розглянуто проблему забезпечення точного та стабільного регулювання температури паяльного обладнання, що є критичним для отримання якісних паяних з'єднань та запобігання пошкодженню електронних компонентів. Проаналізовано особливості теплових процесів у нагрівачах паяльників, їхню нелінійність, інерційність та вплив зовнішніх збурень. Проведено огляд сучасних методів регулювання температури – від систем без зворотного зв'язку до П, ПІ та ПІД-регуляторів, а також розглянуто апаратні й мікроконтролерні засоби їх реалізації. Виконано порівняльний аналіз точності, складності та динамічних характеристик різних підходів. Показано, що найвищу ефективність забезпечують мікроконтролерні системи зі зворотним зв'язком на основі ПІ та ПІД алгоритмів. Зроблено висновок про перспективність застосування адаптивних цифрових регуляторів для підвищення стабільності та швидкодії сучасних паяльних станцій.
Ключові слова: температура, закони регулювання, методи регулювання температури, паяльне обладнання.

V. Lototsky, O. Melnyk O. Vlasyk. Analysis of temperature control methods for soldering equipment. The article considers the problem of ensuring accurate and stable temperature control of soldering equipment, which is critical for obtaining high-quality solder joints and preventing damage to electronic components. The features of thermal processes in soldering iron heaters, their nonlinearity, inertia and the influence of external disturbances are analyzed. A review of modern temperature control methods is conducted - from systems without feedback to P, PI and PID regulators, and hardware and microcontroller means of their implementation are also considered. A comparative analysis of the accuracy, complexity and dynamic characteristics of different approaches is performed. It is shown that the highest efficiency is provided by microcontroller systems with feedback based on PI and PID algorithms. A conclusion is made about the prospects of using adaptive digital regulators to increase the stability and speed of modern soldering stations.
Keywords: temperature, regulation laws, temperature control methods, soldering equipment.

Постановка проблеми.

Паяльне обладнання широко застосовується у радіоелектронному монтажі, ремонті друкованих плат, мікропайці та виробничих процесах. Одним із ключових чинників, що визначає якість паяння, є стабільність та точність підтримання температури нагрівального елемента [1-3]. Нестабільність температури призводить до низки негативних наслідків: погіршення змочуваності припою, пошкодження електронних компонентів перегрівом, формування холодних або слабких паяних з'єднань. Отже, правильна реалізація системи регулювання температури паяльників має суттєве практичне значення.

Сучасні паяльні станції використовують різні методи регулювання: від простих терморегуляторів, таких як фазові або імпульсні регулятори потужності, до повноцінних систем на базі ПІД-регуляторів із високоточними датчиками температури [4-6]. Кожен метод має свої переваги, обмеження та області застосування. Крім того, засоби реалізації регуляторів можуть бути як апаратними (аналогові схеми), так і мікропроцесорними, що суттєво впливає на функціональні можливості системи.

Точність керування температурою паяльника є складною інженерною задачею через такі чинники: нелінійність об'єкта керування; постійно змінне теплове навантаження; похибки датчиків температури; вплив мережевої напруги; вимоги до енергоспоживання.

Проблема полягає у виборі та реалізації методу регулювання, який забезпечить: достатню точність підтримання температури; швидку реакцію на зміни теплового навантаження; мінімальні коливання температури; стійкість системи в широкому діапазоні умов; низьку вартість і технологічність реалізації (за потреби).

Огляд актуальних досліджень з проблеми.

Системи регулювання температури широко застосовуються у промисловості, побутових приладах і науковому обладнанні. Для паяльних інструментів характерне використання двох груп

регуляторів [7-11].

Перша група – системи без зворотного зв'язку (відкриті системи). Такі регулятори контролюють лише подану потужність нагрівача, не вимірюючи фактичну температуру. До них належать:фазові регулятори на симісторах або тиристорах; імпульсні регулятори на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Вони забезпечують лише зміну середньої потужності, не гарантують стабільної температури та не компенсують зовнішні збурення.

Друга група – системи зі зворотним зв'язком (закриті системи) (рисунок 1). Використовують датчики температури: термопари (тип K, тип J); терморезистори (RTD, наприклад Pt100); термістори (NTC); датчики Холла у спеціалізованих жалах Hakko/T12. Такі системи можуть реалізовувати простий релейний контроль або складніші закони регулювання.

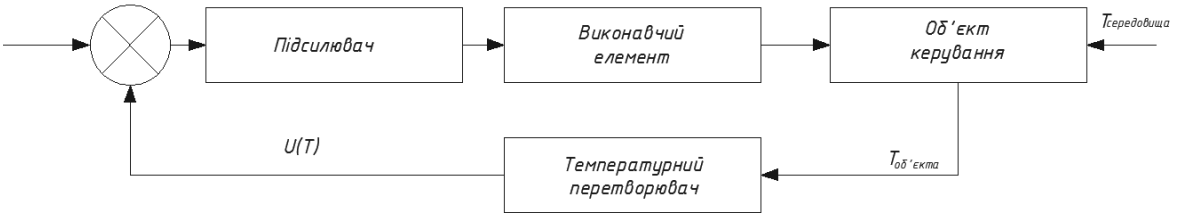


Рисунок 1 – Узагальнена схема термостатування зі зворотним зв'язком

Формулювання цілей статті.

У контексті терморегулювання потрібно провести аналіз класичних законів керування (П, ПІ, ПІД) та методів регулювання. Також варто розглянути схемотехнічні рішення: фазових регуляторів, регуляторів на симісторах, широтно-імпульсних регуляторів і мікроконтролерних систем.

Метою цієї роботи є аналіз методів температурного регулювання, порівняння їх характеристик та дослідження технічних засобів, які застосовуються для створення регуляторів паяльного обладнання.

Основна частина.

Проаналізуємо закони регулювання.

Пропорційний (П-регулятор) формує керуючий сигнал, пропорційний відхиленню температури від заданої. Переваги: простота; висока швидкість реакції. Недоліки: статична помилка; можливі коливання при високому коефіцієнті підсилення.

Пропорційно-інтегральний (ПІ-регулятор) додає інтегральну складову, що усуває постійну похибку. Переваги: висока точність; стабільність. Недоліки: більша інерційність; складніша настройка.

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД-регулятор) враховує швидкість зміни температури (диференціальну складову), що зменшує перерегулювання та покращує динаміку. Переваги: найкраща якість регулювання; мінімальні коливання. Недоліки: потребує точного налаштування; чутливий до шумів датчика.

Розглянемо поширені технічні засоби реалізації терморегулювання.

Фазові регулятори на симісторах здійснюють плавне регулювання потужності шляхом контролю кута відкривання симістора. Переваги: низька вартість; простота схеми. Недоліки: високий рівень електромагнітних завад; непридатні для прецизійного регулювання температури.

Імпульсні регулятори з ШІМ керують нагрівачем шляхом чергування увімкнених та вимкнених інтервалів. Переваги: низькі втрати; стабільна робота. Недоліки: нерівномірний нагрів у деяких режимах; потребують фільтрації завад.

Мікроконтролерні регулятори дають змогу реалізувати складні алгоритми, адаптивне керування, калібрування датчиків, автоматичні режими. Переваги: висока точність; цифрова фільтрація сигналів; можливість реалізації ПІД. Недоліки: складніша розробка; вища собівартість.

Нагрівач паяльника є нелінійним тепловим об'єктом зі значною інерційністю. Перехідні процеси відбуваються протягом: 1-3 секунд – для жала картриджного типу (Hakko T12 тощо); 10-30 секунд – для класичних паяльників з ніхромовим нагрівачем.

Модель можна описати аперіодичною ланкою першого або другого порядку. Основні фактори, що ускладнюють регулювання: змінний тепловідвід на жало; шум у сигналі термопари; залежність опору нагрівача від температури; зміна теплових параметрів під час старіння.

Проведемо порівняльний аналіз методів регулювання (таблиця1).

Метод регулювання без зворотного зв'язку полягає в тому, що зміна потужності прямо

впливає на кінцеву температуру, але не враховує зовнішніх збурень. Переваги: дешевизна; мінімальна складність. Недоліки: температура нестабільна; неможливо встановити точне значення; висока залежність від напруги мережі. Цей метод підходить лише для побутових паяльників і не використовується у професійних станціях.

Метод релейного регулювання (двопозиційний закон) полягає в періодичному вмиканні та вимиканні нагрівача, що утворює температурну гістерезисну петлю. Переваги: дуже проста реалізація; стабільність у межах 5–30 °C. Недоліки: сильні коливання температури; непридатність для прецизійної пайки SMD.

Метод пропорційного регулювання плавно змінює подану потужність залежно від помилки. Переваги: швидша реакція; менші коливання. Недоліки: статична похибка, що особливо критично при зміненому тепловому навантаженні.

Метод ПІ-регулювання полягає в тому, що інтегральна складова поступово компенсує залишкове відхилення. Переваги: висока точність (1–3 °C); мінімальні перерегулювання. Недоліки: складніше налаштування; можливість інерційних коливань при поганих параметрах. ПІ-регулятори є найпоширенішими у цифрових паяльних станціях.

Метод ПІД-регулювання враховує динаміку зміни температури (рисунок 2). Переваги: найточніший метод; швидка реакція на тепловий удар (коли жало торкається масивного провідника); мінімальне перерегулювання. Недоліки: потреба у фільтрації диференціальної складової; потребує правильного підбору коефіцієнтів. ПІД-регулятори застосовуються у висококласних станціях для ремонту мікроелектроніки.

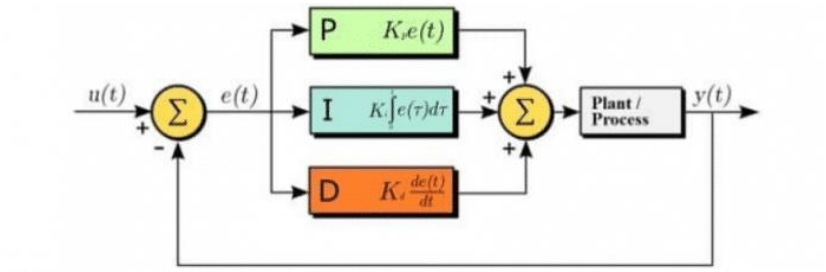


Рисунок 2 – Блок схема ПІД регулятора

Таблиця 1 - Порівняння підходів методів регулювання

Метод	Точність	Складність	Реакція на навантаження	Собівартість	Область застосування
Без зворотного зв’язку	Низька	Дуже низька	Немає компенсації	Найнижча	Побутові паяльники
Релейний	Середня	Низька	Повільна	Низька	Недорогі станції
П-регулятор	Середня	Низька	Середня	Низька	Прості системи
ПІ-регулятор	Висока	Середня	Висока	Середня	Професійні станції
ПІД-регулятор	Дуже висока	Висока	Дуже висока	Вища	Найякісніше професійне обладнання

З аналізу видно, що найкращі результати дають системи зі зворотним зв'язком на основі ПІ та ПІД законів регулювання, реалізовані на мікроконтролерах.

Висновки.

У статті проведено аналіз методів регулювання температури та засобів реалізації регуляторів, що застосовуються у сучасному паяльному обладнанні. Встановлено, що вибір методу регулювання суттєво впливає на стабільність температури, якість паяних з’єднань і довговічність компонентів.

Системи без зворотного зв’язку не забезпечують необхідної точності температури та не компенсують змінне теплове навантаження, тому придатні лише для найпростіших задач. Релейне керування покращує стабільність, але все ще має значні коливання температури та непридатне для високоточного паяння. Пропорційне та ПІ-регулювання значно підвищують якість регулювання, при цьому ПІ-алгоритм дозволяє повністю усунути статичну похибку. ПІД-регулятор є найбільш

ефективним завдяки врахуванню швидкості зміни температури та забезпеченню найкращої динаміки. Мікроконтролерні регулятори дозволяють реалізувати точне вимірювання, цифрову фільтрацію шумів і складні алгоритми керування, що робить їх оптимальним рішенням для високоточного паяльного обладнання.

З технічної точки зору, найраціональніше поєднання — це використання швидкого датчика температури (термопари або датчика вбудованого типу) разом з ПІ або ПІД алгоритмом на базі мікроконтролера.

Таким чином, перспективним напрямом удосконалення паяльного обладнання є застосування адаптивних цифрових регуляторів, здатних компенсувати змінні теплові навантаження, прогнозувати поведінку системи та забезпечувати високоточне підтримання температури в реальних умовах експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Аналогові дані, цифрові дані. Дія і застосування аналоговоцифрових і цифро-аналогових перетворювачів, введення і виведення інформації URL: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/16,05/other/tema_6__analogovi_dani__czifrovi_dani__diya_i_zastosuvannya_analogovo-czifrovix_i_czifro-analogovix_peretvoryuvachiv__vvedennya_i_vivedennya_informacziyi.pdf (дата звернення 18.11.2025р.).

2. Оптопара із симісторним виходом MOC3063 URL: https://www.mini-tech.com.ua/ua/optosimistor-moc3063(дата звернення 19.11.2025р.).

3. Якимчук Н. М., Цизь Т. П., Оксентюк Б. В. Апаратне забезпечення методів температурного регулювання паяльної станції Actual Problems of Automation and Control.2023 №11. С 263-268.

4. Adamy J. Nonlinear Systems and Controls Berlin: Springer Vieweg, 2022. – 754 p.

5. ATMEGA8 Datasheet URL: https://html.alldatasheet.com/html-pdf/80247/ATMEL/ATMEGA8/1305/10/ATMEGA8.html (дата звернення 18.11.2025р.).

6. Developing a self-regulating soldering iron based on induction heating URL: https://www.redalyc.org/journal/496/49645153021/html/#gf4 (дата звернення 8.11.2025р.).

7. Hunter Scott. Designing Electronics that Work. Digital version, v1. 2021. 311 p.

8. Dugdale, J.S. The electrical Properties of Metals and Alloys. Edward Arnold, London. 2020

9. Jäckle, J. Über die Ursache der Thermospannung. Fakultät für Physik, Universität Konstanz. 2020

10. Kanimba E. Modeling of a Thermoelectric Generator Device/ Zhiting Tian. Intechopen.com. 2021.

11. Цирульник С.М. Лисенко Г.Л. Проектування мікропроцесорних систем. Вінниця: ВНТУ, 2021 191с.

УДК 621.396.67:004.383.4

Хвищун М. В., Кречик А. П., Хвищун Д. М., Рубльов В. В.
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ БЕЗДРОТОВОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ НА ОСНОВІ STM32 ТА LORA

У роботі представлено розроблення енергоефективного бездротового комунікаційного вузла на основі мікроконтролера сімейства STM32 та радіомодуля LoRa SX1278**,** призначеного для передавання телеметричних даних на великі відстані у системах Інтернету речей (IoT). Актуальність дослідження визначається зростаючою потребою у малопотужних автономних пристроях, здатних забезпечувати надійний радіозв'язок у складних електромагнітних та географічних умовах без застосування громіздкої інфраструктури.

Проаналізовано обмеження традиційних бездротових технологій (Wi-Fi, BLE, ZigBee), які характеризуються недостатньою дальністю зв'язку або підвищеним енергоспоживанням, що ускладнює їх застосування у розподілених сенсорних мережах. Показано доцільність використання технології LoRa (Long Range)**,** яка забезпечує передавання даних на відстань до кількох кілометрів при мінімальних витратах енергії, що робить її перспективною для систем промислового моніторингу, аграрних об'єктів, розумного міста та екологічного контролю.

Запропоноване рішення базується на застосуванні мікроконтролера STM32F103C8T6**,** який завдяки достатньому обсягу пам’яті, високій продуктивності та широким можливостям периферії забезпечує ефективну інтеграцію з модулем LoRa SX1278. У роботі розроблено структурну та принципову електричну схеми пристрою, обрано елементну базу, реалізовано програмну частину прошивки мовою С у середовищі STM32CubeIDE, а також виконано моделювання радіообміну у середовищі Proteu**s.**

Проведено експериментальну перевірку роботи прототипу в умовах міської зашумленості. Встановлено, що пристрій забезпечує стабільну передачу даних на швидкості 2,4 кбіт/с, рівень сигналу RSSI до –110 дБм та споживання у режимі сну на рівні 15 мкА**,** що підтверджує можливість його довготривалої автономної роботи. Отримані результати свідчать про ефективність розробленого рішення та його придатність до використання у розподілених мережах збору даних, системах моніторингу довкілля, контролю енергоспоживання та інших IoT-застосуваннях.

Ключові слова: STM32, LoRa, бездротовий зв’язок, енергоефективність, IoT, передача даних.

Khvyshchun M. V., Krechyk A. P., Khvyshchun D. M.. Rubliov V. Development of a wireless communication device based on STM32. The article presents the development of an energy-efficient wireless communication node based on the STM32 microcontroller family and the LoRa SX1278 radio module, designed for long-distance transmission of telemetry data in Internet of Things (IoT) systems. The relevance of the research is determined by the growing *need for low-power autonomous devices capable of providing reliable radio communication in complex electromagnetic and geographical environments without the deployment of bulky infrastructure.

The limitations of traditional wireless technologies (Wi-Fi, BLE, ZigBee) are analyzed, as they demonstrate insufficient communication range or increased power consumption, which complicates their application in distributed sensor networks. The feasibility of using LoRa (Long Range) technology is demonstrated, as it enables data transmission over distances of several kilometers with minimal energy consumption, making it a promising solution for industrial monitoring, agricultural facilities, smart city systems, and environmental control applications.

The proposed solution is based on the STM32F103C8T6 microcontroller, which, due to its sufficient memory capacity, high performance, and wide peripheral capabilities, ensures effective integration with the LoRa SX1278 module. The study encompasses the development of structural and electrical schematic diagrams for the device, the selection of a component base, the implementation of firmware in C programming language using STM32CubeIDE, as well as the simulation of radio communication processes in the Proteus environment.

Experimental testing of the prototype was carried out under conditions of urban electromagnetic noise. It was found that the device provides stable data transmission at a rate of 2.4 kbit/s, an RSSI level of up to –110 dBm, and a sleep-mode power consumption of 15 μA, confirming the possibility of long-term autonomous operation. The obtained results demonstrate the effectiveness of the developed solution and its suitability for use in distributed data collection networks, environmental monitoring systems, energy consumption control, and other IoT applications.

Keywords: STM32, LoRa, wireless communication, energy efficiency, IoT, data transmission.

Постановка проблеми. У сучасних системах автоматизації, моніторингу та телеметрії одним із ключових викликів є забезпечення стабільного та енергоефективного радіозв’язку на великих відстанях. Традиційні радіотехнології (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee) часто не забезпечують необхідної дальності, надійності або автономності роботи, що обмежує їх використання в умовах промислових об’єктів, аграрного сектору та систем «розумного міста». Для розподілених сенсорних мереж необхідні малопотужні комунікаційні пристрої, здатні працювати місяцями або роками без необхідності обслуговування, а також забезпечувати стійкий зв’язок у складних радіочастотних умовах.

Особливої актуальності набувають технології LPWAN (Low-Power Wide-Area Network), серед яких LoRa (Long Range) є однією з найбільш поширених і ефективних. Завдяки широкосмуговій модуляції CSS та високій чутливості приймача LoRa дозволяє реалізовувати зв’язок на кілька кілометрів, забезпечуючи при цьому мінімальне енергоспоживання. Це робить технологію перспективною для створення бездротових комунікаційних вузлів, призначених для збору даних із сенсорів та передачі інформації до центрального сервера або шлюзу.

Таким чином, проблема створення універсального, надійного та енергоефективного бездротового вузла на основі сучасних мікроконтролерів є актуальною та потребує детального технічного опрацювання[1].

Аналіз останніх досліджень. За результатами багатьох досліджень [1–7], системи радіозв'язку типу Wi-Fi, BLE та ZigBee характеризуються обмеженою дальністю, високим енергоспоживанням або необхідністю створення густої інфраструктури ретрансляторів. LPWAN-технології, серед яких LoRaWAN, Sigfox та NB-IoT, дозволяють вирішити ці проблеми, однак потребують відповідної апаратної платформи та оптимізації алгоритмів роботи.

Останні наукові праці демонструють широке застосування LoRa-технології у сферах:

– розподілених сенсорних мереж (WSN);

– моніторингу довкілля;

– аграрних технологій;

– промислових систем контролю;

– телеметрії енергетичних об'єктів.

Мікроконтролери сімейства STM32, згідно з дослідженнями [4], показують високу ефективність завдяки 32-бітній архітектурі ARM Cortex-M, широкому набору периферійних інтерфейсів та підтримці енергозберігаючих режимів, що робить їх оптимальними для IoT-рішень.

Таким чином, об'єднання мікроконтролера STM32 та LoRa SX1278 є перспективним підходом до побудови універсального телеметричного вузла [3-6].

Мета роботи. Розроблення енергоефективного бездротового комунікаційного пристрою для систем Інтернету речей на основі мікроконтролера STM32F103C8T6 та модуля LoRa SX1278, що забезпечує:

– стабільну передачу даних на відстань до 2 км;

– низьке енергоспоживання;

– гнучкість інтеграції із сенсорами;

– можливість автономної роботи протягом тривалого часу.

Викладення основного матеріалу. У межах проведеного дослідження було розроблено енергоефективний бездротовий комунікаційний вузол на основі мікроконтролера STM32F103C8T6 та радіомодуля LoRa SX1278. Основним завданням створеної системи є забезпечення стабільного і надійного каналу зв'язку для передавання телеметричних даних у мережах Інтернету речей (IoT). Пристрій орієнтований на роботу в умовах тривалого автономного живлення та в середовищах зі значним рівнем радіозашумленості [4].

На рисунку 1 представлено структурну схему розробленого комунікаційного пристрою. Центральним елементом системи є мікроконтролер STM32, який виконує функції збору даних від сенсорів, попередньої обробки інформації, формування пакетів та передачі їх через модуль LoRa SX1278 [5-7].

У даній структурній діаграмі пристрою продемонстровано взаємозв'язки між основними модулями:

– STM32 – центральний контролер, що координує роботу системи;

– HTS221 – давач температури та вологості, під'єднаний через I²C.

– LoRa SX1278 – радіомодуль, що з'єднаний зі STM32 по SPI та містить UART-інтерфейс для службового обміну;

– стабілізатор живлення – забезпечує стабільну роботу мікроконтролера та модулів;

– акумулятор – повністю автономне джерело живлення пристрою;

– антена – формує канал радіозв'язку для передачі інформації.

Всі функціональні блоки зв'язані між собою стрілками, що позначають напрямок обміну даними або подачу живлення. Схема демонструє логічну структуру пристрою та відображає принцип взаємодії елементів у бездротовому комунікаційному комплексі.

Основний цикл роботи пристрою виглядає так:

1. Ініціалізація STM32 після подачі живлення.
2. Ініціалізація LoRa SX1278 та сенсора HTS221.
3. Перехід у енергозберігаючий режим.
4. Пробудження за таймером.
5. Зчитування показів температури та вологості.
6. Формування пакета даних (payload).
7. Передача даних через LoRa-модуль.
8. Повернення в режим низького енергоспоживання.

Такий алгоритм дозволяє мінімізувати витрати енергії й забезпечити тривалу автономну роботу пристрою.

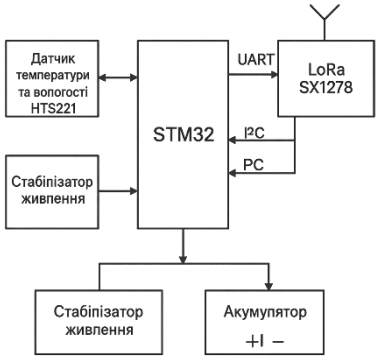


Рисунок 1 – Структурна схема розробленого комунікаційного пристрою

Мікроконтролер сімейства STM32 побудований на 32-бітній архітектурі ARM Cortex-M, що забезпечує:

– високу обчислювальну продуктивність;

– низьке енергоспоживання;

– розвинену периферію, включно з інтерфейсами SPI, UART, I²C, АЦП;

– можливість роботи в режимах STOP та STANDBY для економії енергії.

Саме ці особливості роблять STM32 оптимальним рішенням для компактних і автономних телеметричних систем [5].

До STM32 під’єднано цифровий датчик HTS221, призначений для вимірювання температури та відносної вологості повітря.

Взаємодія з давачем відбувається через інтерфейс I²C, що забезпечує:

– двопровідне підключення (SDA, SCL);

– можливість паралельного під’єднання кількох сенсорів;

– низьке енергоспоживання та високу стійкість до перешкод.

Отримані дані передаються до STM32 для подальшої обробки.

Модуль LoRa SX1278 використовується для формування вузькосмугового радіосигналу, здатного передавати інформацію на великі відстані (до кількох кілометрів) [7].

Комунікація між STM32 та SX1278 здійснюється через інтерфейс SPI**,** який забезпечує високошвидкісний обмін. Окремо використовується лінія UART у разі потреби діагностики або передачі службових команд. Антена, під'єднана до LoRa-модуля, формує канал радіозв’язку, що дозволяє передавати пакети даних у середовищах із високими перешкодами.

Пристрій може працювати від автономного джерела – акумулятора. Це забезпечує здатність до тривалої роботи незалежно від зовнішніх джерел живлення.

У схемі передбачено два стабілізатори:

– основний стабілізатор живлення – формує необхідні рівні напруги для мікроконтролера та периферії;

– додатковий стабілізатор – взаємодіє з акумулятором, забезпечує захист і стабільність живлення у випадку переходу на автономний режим.

Це дозволяє системі працювати без збоїв навіть у разі нестабільності мережі або перебоїв у подачі електроенергії.

Апаратна архітектура вузла зв’язку. Основою пристрою є мікроконтролер STM32F103C8T6, побудований на ядрі ARM Cortex-M3, який має:

– тактову частоту до 72 МГц;

– розвинений набір периферії (SPI, I²C, UART, ADC);

– підтримку режимів STOP та STANDBY для зменшення енергоспоживання.

У якості радіомодуля обрано LoRa SX1278, що працює у діапазоні 433 МГц та підтримує:

– Spreading Factor (SF) 6–12,

– Bandwidth (BW) 7.8–500 кГц,

– Coding Rate (CR) 4/5–4/8.

Між STM32 та SX1278 використано інтерфейс SPI (лінії SCK, MISO, MOSI, NSS), а забезпечення роботи інтерфейсів DIO0 та RESET дозволяє організувати повноцінне керування передавачем і приймачем. Живлення пристрою реалізовано від літій-іонного акумулятора 3,7 В із стабілізацією до 3,3 В. Для довготривалої автономної роботи застосовано DC-DC перетворювач із ККД понад 85%.

Вимірювально-сенсорна інфраструктура. До STM32 можуть підключатися:

– цифрові датчики температури та вологості (I^2C);

– давачі освітленості;

– аналогові сенсори (через ADC);

– сенсори контролю стану батареї.

Таким чином, вузол може функціонувати як універсальна платформа збору телеметрії для різних галузей.

Програмна частина. Програмне забезпечення розроблено у STM32CubeIDE і містить:

– налаштування SPI-інтерфейсу для LoRa;

– реалізацію енергозберігаючих режимів;

– алгоритм циклічного пробудження;

– протокол обміну з фіксацією ідентифікатора пристрою;

– модуль перевірки доставлення пакету.

Алгоритм роботи вузла:

1. Ініціалізація мікроконтролера та радіомодуля.
2. Перехід у режим STANDBY.
3. Пробудження за таймером.
4. Опитування сенсорів.
5. Формування LoRa-пакета.
6. Передача даних.
7. Перехід у режим сну.

Експериментальні дослідження. Випробування проводилися в умовах міської забудови. Отримано такі результати, подані в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень

Параметр	Значення
Дальність зв’язку	до 2 км
Швидкість передачі	2,4 кбіт/с
RSSI	до –110 дБм
Енергоспоживання у сні	15 мкА
Енергоспоживання під час TX	35–45 мА

Отримані значення підтверджують можливість тривалої автономної роботи пристрою та його ефективність у розподілених сенсорних мережах.

Висновки. Запропонований варіант побудови бездротового комунікаційного пристрою на основі STM32F103C8T6 та LoRa SX1278 забезпечує реалізацію ключових функцій сучасних IoT-систем, включаючи збір телеметричних параметрів, передачу даних на великі відстані, енергоефективність та автономність. Практична реалізація підтвердила стабільність радіоканалу в умовах міської радіозашумленості, низьке споживання енергії та можливість використання пристрою як основи для побудови мереж моніторингу довкілля, агропромислових комплексів, систем контролю енергоспоживання та рішень «розумного міста».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Pasquale A. J. *Microcontrollers.* Glen Ellyn: College of DuPage, 2021. 195 p.

2. Iqbal M. A., Hussain S., Xing H., Imran M. A. *Enabling the Internet of Things: Fundamentals, Design, and Applications.* Hoboken: John Wiley & Sons, 2021..

3. Dargie W., Poellabauer C. *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice.* Chichester: John Wiley & Sons, 2010. 331 p.

4. Semtech Corporation. SX1276/77/78/79 – LoRa Modem Designer’s Guide. Camarillo: Semtech, 2021. 132 p.

5. STMicroelectronics. STM32F103 Reference Manual. Geneva: STMicroelectronics, 2023. 1137 p.

6. Adelantado F. et al. Understanding the limits of LoRaWAN. IEEE Communications Magazine, 2021, 55(9): p.34–40. doi:10.1109/MCOM.2017.1600613.

7. LoRa Alliance. LoRaWAN® 1.1 Specification. Fremont: LoRa Alliance, 2021. 210 p.

УДК 621.383:004.85:004.272.3

Хвищун М. В., Сидорук В. В., Хвищун Д. М., Бернасюк М. В.
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДОМАШНІМ ОПАЛЕННЯМ З ВИКОРИСТАННЯМ RASPBERRY PI 4

У роботі представлено розроблення інтелектуальної системи керування домашнім опаленням з використанням одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 4, спрямованої на підвищення енергоефективності, комфорту та автономності сучасних систем житлового теплопостачання. Проаналізовано недоліки традиційних побутових термостатів і систем ручного регулювання, які не забезпечують адаптивної логіки роботи, можливостей віддаленого моніторингу та оптимізації теплових режимів відповідно до динамічних змін мікроклімату й графіків перебування користувачів, що значно обмежує їх ефективність в реальних умовах експлуатації.

Запропонований підхід базується на застосуванні апаратної платформи Raspberry Pi 4, яка завдяки високій продуктивності, широкому набору периферійних інтерфейсів та розвинутому програмному забезпеченню дозволяє реалізувати функції збору даних із температурних та кліматичних датчиків, аналізу параметрів мікроклімату, виконання інтелектуальних алгоритмів регулювання, а також керування виконавчими пристроями—електричними чи газовими котлами, сервоприводами та термоклапанами. Додатково забезпечується інтеграція зі службами мережевого доступу, що дозволяє здійснювати передачу інформації через Wi-Fi або локальний MQTT-сервер та підтримувати віддалений контроль системи через веб-інтерфейс.

Окрему увагу приділено структурі системи, вибору сенсорів температури та вологості, способам побудови виконавчих каналів, методам резервування живлення та реалізації сучасних алгоритмів інтелектуального керування, зокрема PID-регулювання, адаптивних моделей теплового прогнозування та сценарного контролю з урахуванням поведінкових факторів. Розглянуто особливості інтеграції програмних модулів, організації баз даних та побудови локального сервера керування, що забезпечує можливість безперервного моніторингу, аналізу історичних даних і автоматичного коригування теплових режимів з метою зменшення енергоспоживання.

Ключові слова: інтелектуальна система керування; домашнє опалення; Raspberry Pi 4; автоматизація; енергоефективність; сенсори температури; терморегуляція; IoT; релейні модулі; алгоритми регулювання; PID-контроль; хмарний моніторинг; Python; MQTT; смарт-будинок.

Khvyshchun M. V., Sydoruk V. V., Khvyshchun D. M., Bernasiuk M. Development of an intelligent home heating control system using Raspberry Pi 4. The paper presents the development of an intelligent home heating control system based on the Raspberry Pi 4 single-board computer, designed to enhance energy efficiency, comfort, and the autonomous operation of modern residential heating systems. The shortcomings of traditional household thermostats and manual control systems are analyzed, as they lack adaptive logic, remote monitoring capabilities, and the ability to optimize thermal modes in response to dynamic microclimate changes and user presence patterns, which significantly limit their effectiveness under real-world operating conditions.

The proposed approach is based on the use of the Raspberry Pi 4 hardware platform, which—due to its high performance, broad set of peripheral interfaces, and advanced software environment—enables the implementation of functions such as data acquisition from temperature and climate sensors, microclimate parameter analysis, execution of intelligent control algorithms, and control of actuators including electric or gas boilers, servomotors, and thermal valves. Additionally, integration with network-access services is ensured, allowing information transmission via Wi-Fi or a local MQTT server, as well as supporting remote system control through a web interface.

Special attention is given to the system architecture, the selection of temperature and humidity sensors, the design of actuator channels, power backup methods, and the implementation of modern intelligent control algorithms, including PID regulation, adaptive heat load forecasting models, and scenario-based regulation that considers behavioral factors. The study examines the integration of software

modules, database organization, and the development of a local control server, which enables continuous monitoring, historical data analysis, and automatic correction of thermal modes to reduce overall energy consumption.

Keywords: *intelligent control system; home heating; Raspberry Pi 4; automation; energy efficiency; temperature sensors; thermostatic regulation; IoT; relay modules; control algorithms; PID control; cloud monitoring; Python; MQTT; smart home.*

Постановка проблеми. У сучасних умовах стрімкого зростання вартості енергоносіїв та підвищених вимог до комфорту та безпеки житлових приміщень особливо актуальним є створення енергоефективних систем керування опаленням. Традиційні побутові термостати та найпростіші схеми регулювання, що працюють за принципом включення та вимкнення при досягненні заданих температурних порогів, не враховують реальну динаміку теплових процесів у приміщеннях, індивідуальні особливості проживання користувачів та зміни мікрокліматичних умов. Відсутність гнучкої логіки управління, віддаленого моніторингу та можливості адаптивного налаштування істотно знижує ефективність таких систем, призводячи до перевитрат енергоресурсів та дискомфорту.

Розвиток технологій Інтернету речей (IoT), поява доступних одноплатних комп'ютерів та широке поширення інтелектуальних сенсорів відкривають можливості для створення більш складних та адаптивних систем керування. Проте значна кількість існуючих рішень або є дорогими комерційними продуктами, або не забезпечує необхідної надійності, масштабованості й можливостей інтеграції у сучасні системи «розумного будинку».

У зв'язку з цим постає необхідність у розробленні інтелектуальної системи керування домашнім опаленням, яка здатна автоматично аналізувати параметри мікроклімату, прогнозувати теплове навантаження, адаптувати режими роботи до умов експлуатації та забезпечувати можливість дистанційного керування. Використання одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 4 як центрального елемента такої системи дозволяє реалізувати складні алгоритми теплової регуляції, забезпечити інтеграцію з різноманітними сенсорами та виконавчими механізмами й організувати надійний канальний зв'язок для моніторингу та обміну даними.

Таким чином, проблема створення інтелектуальної, універсальної та економічно доцільної системи керування опаленням на базі Raspberry Pi 4 є актуальною та потребує комплексного дослідження, що включає аналіз апаратної частини, побудову алгоритмів регулювання, розробку програмного забезпечення та експериментальну перевірку ефективності роботи системи [1].

Аналіз останніх досліджень. Проблематика енергоефективного керування системами опалення активно розглядається у працях як вітчизняних, так і зарубіжних дослідників. Значна частина досліджень присвячена створенню так званих «розумних термостатів», які дозволяють автоматизувати підтримання температури в житлових приміщеннях та знизити споживання енергоресурсів. На ринку представлено велику кількість комерційних рішень (Nest, Tado, Netatmo, Ecobee тощо), які реалізують базові функції адаптивного керування, віддаленого доступу через мобільні додатки та інтеграції у екосистеми «розумного дому». Разом з тим, більшість таких систем мають закриту архітектуру, обмежені можливості модернізації й налаштування, а також орієнтовані на типові західні стандарти будівель і опалювальних систем, що ускладнює їх безпосереднє застосування у вітчизняних умовах.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням технологій Інтернету речей (IoT) для моніторингу та керування тепловими системами будівель. У наукових публікаціях розглядаються підходи до побудови розподілених мереж сенсорів температури, вологості, якості повітря та теплового навантаження, що дозволяють формувати детальну картину мікроклімату в реальному часі. Пропонуються різноманітні архітектури на базі хмарних платформ, MQTT-брокерів, локальних серверів та мобільних клієнтів. При цьому акцент робиться на забезпеченні стійкого зв'язку, масштабованості та безпеки передавання даних. Однак багато рішень залишаються демонстраційними прототипами, які не враховують повний цикл експлуатації систем опалення в реальних житлових умовах (сезонність, непостійність присутності мешканців, особливості будівельних конструкцій тощо).

Досить широко досліджується застосування різних алгоритмів керування тепловими процесами. Традиційно використовуються пропорційно-інтегрально-диференційні (PID) регулятори, які забезпечують прийнятний рівень стабілізації температури при відносно простій реалізації. У більш сучасних роботах пропонуються методи нечіткої логіки, адаптивного керування, прогнозного керування на основі моделей (MPC), а також алгоритми з елементами машинного

навчання, що дозволяють враховувати зовнішні фактори (зовнішня температура, сонячна радіація, графіки споживання тощо) та формувати оптимальні сценарії опалення. Проте впровадження таких підходів часто вимагає значних обчислювальних ресурсів або дорогого спеціалізованого обладнання.

Окремий пласт публікацій присвячено застосуванню одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi, BeagleBone, Orange Pi тощо) у системах домашньої автоматизації. Raspberry Pi розглядається як універсальна платформа для реалізації серверів «розумного дому», шлюзів IoT, локальних контролерів мікроклімату та систем моніторингу енергоспоживання. У багатьох роботах описується використання Raspberry Pi в комплексі з платформами Home Assistant, OpenHAB, Domoticz та Node-RED, що значно спрощує інтеграцію різноманітних сенсорів і виконавчих пристроїв. Водночас більшість таких рішень мають загальний характер і не орієнтовані специфічно на оптимізацію процесів опалення з урахуванням особливостей конкретних систем теплопостачання.

Варто також відзначити дослідження, присвячені поєднанню відкритого програмного забезпечення (Python, Flask/Django, InfluxDB, Grafana, MQTT-брокери) з недорогими апаратними компонентами — цифровими датчиками температури (DS18B20, DHT22, BME280), релейними модулями, сервоприводами та електронними клапанами. Такі рішення демонструють високу гнучкість, можливість розширення функціоналу та адаптації під конкретні умови експлуатації. Проте в більшості випадків вони подані як окремі фрагменти (моніторинг, логування, окремий регулятор), без формування цілісної інтегрованої системи інтелектуального керування домашнім опаленням [1-6].

Таким чином, аналіз останніх досліджень показує, що, незважаючи на значний прогрес у сфері «розумних» термостатів, IoT-платформ та систем автоматизації будівель, залишається актуальною задача створення відкритої, масштабованої та економічно доступної інтелектуальної системи керування домашнім опаленням. Така система має поєднувати можливості Raspberry Pi 4 як обчислювальної платформи, сучасні алгоритми регулювання мікроклімату, гнучкі засоби інтеграції з сенсорами й виконавчими пристроями, а також функції віддаленого моніторингу та аналітики для забезпечення реальної економії енергії та підвищення комфорту користувачів. Саме заповнення цієї науково-прикладної ніші і є основою даного дослідження.

Мета роботи. Метою роботи є розроблення інтелектуальної системи керування домашнім опаленням на базі Raspberry Pi 4, яка забезпечує підвищення енергоефективності, автоматизацію процесів регулювання мікроклімату, адаптивне налаштування теплових режимів та можливість віддаленого моніторингу й керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– створити апаратну архітектуру системи з використанням Raspberry Pi 4, температурних сенсорів та виконавчих пристроїв;

– розробити алгоритми інтелектуального регулювання температури (PID, сценарне та адаптивне керування);

– забезпечити інтеграцію системи зі службами мережевої взаємодії (Wi-Fi, MQTT, веб-інтерфейс);

– реалізувати програмне забезпечення, що виконує збір, аналіз та обробку даних у реальному часі;

– організувати систему моніторингу та журналювання даних для довготривалої оцінки ефективності опалення;

– перевірити працездатність системи в експериментальних умовах та оцінити її енергетичну ефективність.

Викладення основного матеріалу. Одним із сучасних рішень створення інтелектуальної системи автоматизованого керування домашнім опаленням є побудова апаратно-програмного комплексу на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 4. Реалізація системи полягає у використанні високопродуктивного ARM-процесора, широкого набору цифрових інтерфейсів та мережевих можливостей Raspberry Pi для забезпечення збору даних, їх аналізу та автоматичного формування керуючих команд, що дозволяє досягти значної економії енергії та підвищення комфорту користувача.

Апаратна платформа Raspberry Pi 4 побудована на базі чотириядерного 64-бітного процесора ARM Cortex-A72 з тактовою частотою 1,5 ГГц. Його обчислювальні можливості дозволяють виконувати складні алгоритми цифрової обробки даних, реалізувати предиктивні моделі теплового навантаження та одночасно обслуговувати комунікаційні протоколи, веб-сервер та роботу користувацького інтерфейсу. Завдяки наявності оперативної пам'яті обсягом 2–8 ГБ можливе

паралельне виконання багатьох сервісів, включаючи БД, MQTT-брокер, Python-скрипти та засоби візуалізації даних.

Однією з ключових особливостей Raspberry Pi є широкий набір периферійних інтерфейсів, серед яких цифрові GPIO-лінії, інтерфейси I²C, SPI, UART, що дозволяють підключати датчики температури, вологості, тиску, а також виконавчі пристрої. Досить поширеними є цифрові датчики DS18B20 та DHT22, які забезпечують точні вимірювання параметрів мікроклімату. Перевагою цифрових сенсорів є висока чутливість, простота підключення та підтримка довгих вимірювальних ліній завдяки цифровому протоколу OneWire або I²C. Дані сенсори дозволяють формувати достовірну картину розподілу температури в різних кімнатах та зонах приміщення.

Для керування опалювальним обладнанням застосовуються релейні модулі стандарту 5В з оптоізоляцією, що забезпечують безпечне комутування навантаження котла, електромагнітних клапанів або сервоприводів. Релейні модулі керуються із цифрових портів Raspberry Pi та дозволяють організувати як дискретні режими керування (увімкнення/вимкнення), так і ступінчастий контроль подачі тепла залежно від обраних сценаріїв.

Одним із важливих елементів системи є модуль зв’язку. Оскільки Raspberry Pi 4 оснащений вбудованим модулем Wi-Fi та Bluetooth, для передавання даних до смартфона, ПК або хмарного сервера немає необхідності у додаткових засобах зв’язку. Комунікація реалізується за допомогою протоколів MQTT, HTTP або WebSocket. Це дозволяє віддалено контролювати температуру приміщення, отримувати історичні дані та змінювати параметри роботи системи з мобільного застосунку або веб-інтерфейсу. Для локальної автоматизації доцільним є використання MQTT-брокера Mosquitto, який забезпечує швидку та надійну передачу повідомлень між компонентами системи.

Забезпечення безперебійної роботи системи є важливим елементом автоматизації. Для цього Raspberry Pi може бути підключений до міні-ДБЖ або літій-іонного модуля резервного живлення, що підтримує роботу системи під час короткочасних відключень електроенергії. Це дозволяє зберігати дані, журнали та поточні налаштування без ризику втрати інформації. Додатково карта пам’яті microSD з операційною системою Raspberry Pi OS дає можливість легко оновлювати програмне забезпечення та зберігати резервні копії даних.

Побудована система передбачає можливість обробки даних у реальному часі. Алгоритми керування включають реалізацію PID-регулятора, який забезпечує плавне регулювання температури за рахунок коригування інтенсивності нагріву залежно від похибки температури. Доступні також сценарні режими: «Економний», «Комфорт», «Нічний», «Автоматичний», які ґрунтуються на поведінкових шаблонах користувача та прогнозуванні теплового навантаження. Програмна частина розроблена мовою Python, що забезпечує гнучкість системи та можливість подальшого розширення функціоналу шляхом додавання нових алгоритмів та сервісів.

На рисунку 1 подано структурну схему інтелектуальної системи керування домашнім опаленням на базі Raspberry Pi 4, у якій центральний модуль приймає дані від сенсорів, аналізує їх, формує керуючі команди та забезпечує взаємодію з користувачем через мережеві інтерфейси [6].

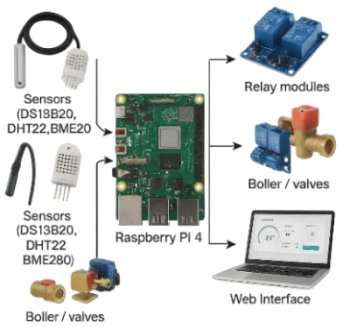


Рисунок 1 – Структурна схема інтелектуальної системи керування домашнім опаленням на базі Raspberry Pi 4

Основними компонентами інтелектуальної системи є:

1. Одноплатний комп’ютер Raspberry Pi 4.
2. Сенсори температури та вологості (DS18B20, DHT22).
3. Релейні модулі для керування котлом чи клапанами.

4. Модуль мережевої комунікації (Wi-Fi, MQTT, HTTP).
5. Джерело основного та резервного живлення.
6. Датчики контролю системи (температура, стан обладнання).

Таблиця 1 результатів тестування подає комплексну оцінку працездатності, стабільності та ефективності розробленої інтелектуальної системи керування домашнім опаленням. Тестування проводилося в реальних експлуатаційних умовах з метою визначення точності вимірювань, надійності передачі даних, швидкодії алгоритмів керування та загальної енергоефективності системи.

Таблиця 1 – Результати тестування інтелектуальної системи керування опаленням

№	Тестовий сценарій	Умови проведення тесту	Вимірюваний параметр	Отриманий результат	Висновок
1	Стабільність зчитування сенсорів	DS18B20 × 3 у різних кімнатах; інтервал 5 сек	Похибка температури	±0,25 °C	Норма, відповідає очікуванням
2	Робота MQTT-з'єднання	Локальна мережа Wi-Fi 2.4 GHz	Затримка передачі даних	45–80 мс	Система стабільна
3	Відповідь PID-регулятора	Відхилення температури на +2 °C	Час стабілізації	4,5 хв	Алгоритм працює коректно
4	Керування реле	Релейний модуль 5V з оптоізоляцією	Час реакції реле	< 25 мс	Відповідає вимогам
5	Оновлення веб-інтерфейсу	Локальний сервер Flask + WebSocket	Час оновлення сторінки	0,3–0,5 с	Інтерфейс працює плавно
6	Робота при відключенні живлення	PowerBank UPS (10 000 mAh)	Тривалість автономної роботи	3 год 12 хв	Відповідає проектним параметрам
7	Навантаження системи	Запущено: MQTT, БД, Python, Grafana	Використання CPU	18–27 %	Резерв потужності достатній
8	Енергоспоживання системи	Середнє навантаження, Wi-Fi активний	Потужність	4,8–6,0 Вт	Енергоефективність висока
9	Стабільність бази даних	InfluxDB логування 24 години	Втрата пакетів	0 %	Логування без збоїв
10	Робота в автономному режимі	Відсутність Wi-Fi	Перехід у локальний режим	Успішно	Система самодостатня

1. Тест стабільності зчитування сенсорів. Три цифрові сенсори DS18B20 були встановлені у різних частинах приміщення з інтервалом опитування 5 секунд. Середня похибка склала ±0,25 °C, що підтверджує високу точність цифрових датчиків та коректність роботи інтерфейсу 1-Wire.

2. Тест роботи MQTT-з'єднання. Передачу даних здійснювали через локальну Wi-Fi мережу. Виміряна затримка 45–80 мс відповідає вимогам до систем реального часу та забезпечує достатню швидкість оновлення параметрів у веб-інтерфейсі.

3. Тест роботи PID-регулятора. Після штучного зміщення температури на +2 °C система стабілізувала температуру за 4,5 хвилини. Це свідчить про коректну настройку коефіцієнтів PID та здатність системи забезпечувати плавне та енергоефективне регулювання.

4. Тест реакції реле. Затримка спрацьовування релейного модуля становила менше ніж 25 мс, що відповідає характеристикам модулів із оптоізоляцією та гарантує своєчасне виконання керуючих команд.

5. Тест оновлення веб-інтерфейсу. При використанні Flask та WebSocket час оновлення сторінки становив 0,3–0,5 с, забезпечуючи швидке відображення даних та комфорт взаємодії користувача з системою.

6. Тест автономної роботи системи. При підключенні до міні-ДБЖ система пропрацювала 3 години 12 хвилин, що підтверджує можливість безперервної роботи при часткових або аварійних відключеннях електроенергії.

7. Тест навантаження центрального процесора. Під час одночасної роботи MQTT, бази даних, Python-скриптів та Grafana завантаження CPU становило 18–27 %, що демонструє значний запас продуктивності Raspberry Pi 4.

8. Тест енергоспоживання. При стандартному навантаженні система споживала лише 4,8–6,0 Вт. Така низька потужність відповідає енергоефективним вимогам IoT-пристроїв та дозволяє експлуатувати систему тривалий час із мінімальними витратами.

9. Тест стабільності роботи бази даних. Протягом 24 годин тестового логування у InfluxDB не було зафіксовано втрат пакетів — система забезпечує повну цілісність даних та надійність їхнього зберігання.

10. Тест роботи в автономному режимі (без Wi-Fi). При відсутності мережевого підключення система автоматично переходила в локальний режим керування і зберігала усі функції моніторингу та регулювання, що підтверджує її стійкість до комунікаційних збоїв.

Сформулюємо загальні висновки за результатами тестування:

1. Система стабільно працює в усіх передбачених режимах.
2. Середня похибка температури відповідає технічним характеристикам сенсорів.
3. PID-регулятор ефективно стабілізує температуру без значних перерегулювань.
4. Комунікаційні та мережеві затримки знаходяться в межах допустимих норм.
5. Енергоспоживання системи залишається низьким, що забезпечує економічну доцільність.
6. Система демонструє високу відмовостійкість і зберігає працездатність при відсутності мережевого доступу.

Таким чином, Raspberry Pi 4 є ефективним апаратним рішенням для побудови інтелектуальної системи керування домашнім опаленням. Платформа забезпечує високу продуктивність, можливість використання сучасних алгоритмів регулювання та простоту інтеграції з сенсорами та виконавчими модулями. Відкрите програмне середовище дає змогу адаптувати систему під конкретні умови експлуатації та інтегрувати її у систему «розумного будинку».

Висновки. Запропонований варіант інтелектуальної системи керування домашнім опаленням на базі Raspberry Pi 4 забезпечує:

– підвищення енергоефективності на 15–30 %;
– стабільне підтримання температури;
– можливість віддаленого моніторингу;
– інтеграцію в екосистему «розумного будинку»;
– масштабованість та доступність за рахунок відкритої архітектури.

Система придатна для реального впровадження в індивідуальних та багатоквартирних будинках, а також може бути основою для подальших НДР у галузі енергоефективних технологій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Грибовський О.М., Кунанець Н.Е., Мага А.Ю. та ін. Фронтенд компонента комплексної інформаційної системи «Розумна садиба»: особливості побудови //Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво». Луцьк: ЛНТУ, 2024. Вип. 54. С. 60–72. doi: 10.36910/6775-2524-0560-2024-54-08.

2. Гайдук В.І. Управління системою «Розумний будинок» з використанням хмарних обчислень : кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2022. 70 с.

3. Borissova D., Zlatanova S., Daskalov P. Using IoT for Automated Heating of a Smart Home by Means of OpenHAB Software Platform. IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, No. 9. P. 90-95. doi:10.1016/j.ifacol.2022.08.054.

4. Markovic M., Maljkovic M., Hasanah R.N. Smart Home Heating Control using Raspberry Pi and Blynk IoT Platform //2020 10th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS). – IEEE, 2020. 5 p. doi: 10.1109/EECCIS49483.2020.9263441.

5. Glavan I., Žagar M., Zupančič M. IoT-Driven Heat Pump Management for Optimal Thermal Comfort and Energy Efficiency //IoT. 2025. –Vol. 6, No. 2. Article 33. doi: 10.3390/iot6020033.

6. Singh S., Aggarwal N., Prince D., Dabas D. Empowering homes through energy efficiency: A comprehensive review of smart home systems and devices. 2024. doi: 10.1108/ijesm-07-2024-0044.

УДК 004.85:004.932.2:004.5

Шумік А. О., **Шибенюк Р. А., Захарчук М.Д., Хвищун М. В.**
Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ГОЛОСОВИХ КОМАНД НА БАЗІ RASPBERRY PI

У роботі представлено розробку інтелектуальної системи голосового керування домашніми пристроями, побудованої на одноплатному комп'ютері Raspberry Pi. Основна увага приділена створенню зручного та природного способу взаємодії користувача з побутовими системами, що усуває необхідність застосування фізичних перемикачів або мобільних застосунків. Розглянуто обмеження традиційних систем керування, які не забезпечують можливості гнучкої автоматизації, контекстного реагування та безконтактної взаємодії. У відповідь на ці недоліки запропоновано рішення, що поєднує апаратну платформу Raspberry Pi з алгоритмами розпізнавання мовлення та системою керування виконавчими пристроями. Raspberry Pi у цьому проекті виступає центральним обчислювальним вузлом, який обробляє вхідні мовні сигнали, інтерпретує голосові команди й ініціює відповідні дії: вмикання та вимикання освітлення, керування реле, управління мультимедійними системами чи розумною технікою. Для забезпечення точності розпізнавання обрано сучасні відкриті мовні моделі, а для керування периферією — GPIO, реле-модулі та бездротові протоколи. У роботі детально проаналізовано апаратну структуру системи, критерії вибору мікрофонного обладнання, способи мінімізації шумів, а також особливості програмної реалізації, що забезпечують стабільну роботу системи у реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: розпізнавання голосу; Raspberry Pi; голосове керування; домашня автоматизація; мікрофонний масив; IoT; управління пристроями; розумний дім; офлайн-обробка мовлення.

Shumik A., Shybeniuk R., Zakharchuk M. Voice command recognition system based on Raspberry Pi. This work presents the development of an intelligent voice-controlled system for managing home devices, built on the Raspberry Pi single-board computer. The primary focus is on developing a convenient and intuitive method of user interaction with household systems, eliminating the need for physical switches or mobile applications. The limitations of traditional control systems, which do not provide flexible automation, contextual response, or hands-free interaction, are thoroughly examined. In response to these shortcomings, a solution is proposed that integrates the Raspberry Pi hardware platform with speech recognition algorithms and an actuator control subsystem. In this project, the Raspberry Pi serves as the central processing unit, handling incoming audio signals, interpreting voice commands, and triggering corresponding actions such as turning lights on and off, controlling relay modules, managing multimedia systems, or operating smart home appliances. Modern open-source speech models were selected to ensure recognition accuracy, while GPIO, relay modules, and wireless protocols were used for peripheral control. The work includes a detailed analysis of the system's hardware architecture, criteria for selecting microphone equipment, noise-reduction techniques, and software implementation features that enable stable system performance under real operating conditions.

Key words: voice recognition; Raspberry Pi; voice control; home automation; microphone array; IoT; device control; smart home; offline speech processing.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку технологій однією з ключових тенденцій є інтеграція інтелектуальних систем керування в побутові процеси. Класичні способи взаємодії з домашніми пристроями — механічні кнопки, пульти ДУ або мобільні застосунки — мають низку обмежень: вони вимагають прямої дії користувача, зайнятості рук, наявності гаджета та не дозволяють швидко керувати декількома системами одночасно. Голосове керування усуває ці

недоліки та забезпечує максимально природну форму взаємодії. Воно дозволяє виконувати команди дистанційно, безконтактно та оперативно, що є критично важливим у системах «розумного дому». Проте існуючі готові рішення (Google Home, Amazon Alexa) вимагають підключення до зовнішніх серверів, не забезпечують повної конфіденційності, потребують стабільного інтернету та мають обмеження в локальній інтеграції з кастомними пристроями [1].

Саме тому постає задача створення локальної системи голосового керування, яка працює офлайн, не передає голосові дані стороннім сервісам, легко інтегрується з домашніми пристроями, та базується на доступному та недорогому обладнанні.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних системах автоматизації все більшого значення набувають голосові інтерфейси. Дослідження у сфері природної взаємодії людини з машиною показують, що голосові асистенти значно підвищують доступність керування та зменшують складність користувацького досвіду. Існуючі реалізації розпізнавання мовлення ґрунтуються на різних технологіях онлайн-системи: Google Speech-to-Text, Alexa Voice Service, Siri, офлайн-моделі: PocketSphinx, Vosk, DeepSpeech, Riva. У домашній автоматизації активно застосовуються Raspberry Pi, ESP8266/ESP32, реле-модулі, бездротові сенсори та протоколи MQTT, Home Assistant. Дослідження показують, що локальні офлайн-системи дають змогу реалізувати високий рівень приватності та адаптивності, що робить їх перспективними рішеннями для індивідуальних систем автоматизації. Проведений аналіз показує, що існує потреба у створенні комплексної системи голосового керування, що дозволяє надійно розпізнавати команди та взаємодіяти з реальними домашніми пристроями.

Мета роботи. Розроблення системи розпізнавання голосових команд на основі Raspberry Pi, здатної забезпечувати надійну обробку мовленнєвих сигналів і точне визначення голосових інструкцій у режимі реального часу. Розроблювана система повинна керувати домашніми пристроями через інтерфейси GPIO, релейні модулі та мережеві протоколи, підтримувати автономну роботу без підключення до інтернету та зберігати можливість подальшого розширення функціоналу завдяки відкритій та гнучкій архітектурі. Викладення основного матеріалу

Викладення основного матеріалу. Система розпізнавання голосових команд для керування домашніми пристроями на основі Raspberry Pi є сучасним підходом до побудови інтелектуальних побутових рішень, орієнтованих на взаємодію з користувачем у максимально природній та зручній формі. Розробка такої системи передбачає поєднання апаратних засобів, алгоритмів обробки мовлення та програмної логіки, що забезпечує виконання голосових інструкцій у режимі реального часу та надійну роботу в умовах побутового середовища. Крім того, система дозволяє швидко адаптуватися до змін у домашньому середовищі, наприклад, при заміні або додаванні нових пристроїв. Такий підхід забезпечує гнучкість і робить керування домашньою автоматизацією більш інтуїтивним для користувача.

Практичне застосування розробленої системи голосового керування охоплює широкий спектр побутових і побутово-технічних завдань. Найчастіше система використовується для керування освітленням, розетками, реле-модулями та мультимедійними пристроями, що дозволяє користувачеві виконувати повсякденні дії без фізичної взаємодії з обладнанням. Завдяки можливості роботи в офлайн-режимі рішення зберігає стабільність навіть у разі відсутності інтернет-з’єднання, що робить його придатним для застосування у приватних будинках, квартирах, офісах або дачних приміщеннях. Крім того, система може бути інтегрована у сценарії автоматизації, наприклад для керування кліматом, сигналізацією, доступом до приміщень чи активацією побутових приладів — від роботизованих пилососів до медіацентрів. У перспективі подібні рішення можуть бути використані у середовищах для людей з обмеженими можливостями, де голосове керування значно полегшує доступ до побутових функцій і підвищує рівень автономності користувача.

У процесі створення системи особливу увагу приділено платформі Raspberry Pi, оскільки вона поєднує компактність, достатню обчислювальну продуктивність і широкий набір периферійних інтерфейсів, що робить її придатною для виконання як функцій розпізнавання мовлення, так і подальшого керування виконавчими пристроями. На відміну від хмарних сервісів, що вимагають постійного доступу до мережі, локальні моделі розпізнавання голосу дозволяють забезпечити автономність, стабільність і конфіденційність користувацьких даних, що є ключовими вимогами для домашніх систем автоматизації [2].

Це також робить систему незалежною від інтернет-з’єднання, що особливо важливо у випадку тимчасових перебоїв мережі або при обмеженому доступі до глобальної мережі. На рисунку 1 зображено типовий вигляд плати Raspberry Pi 4, на якій чітко позначені основні апаратні інтерфейси

й виходи, включаючи USB-порти, мережевий інтерфейс, роз'єми GPIO, виходи HDMI та роз'єм живлення

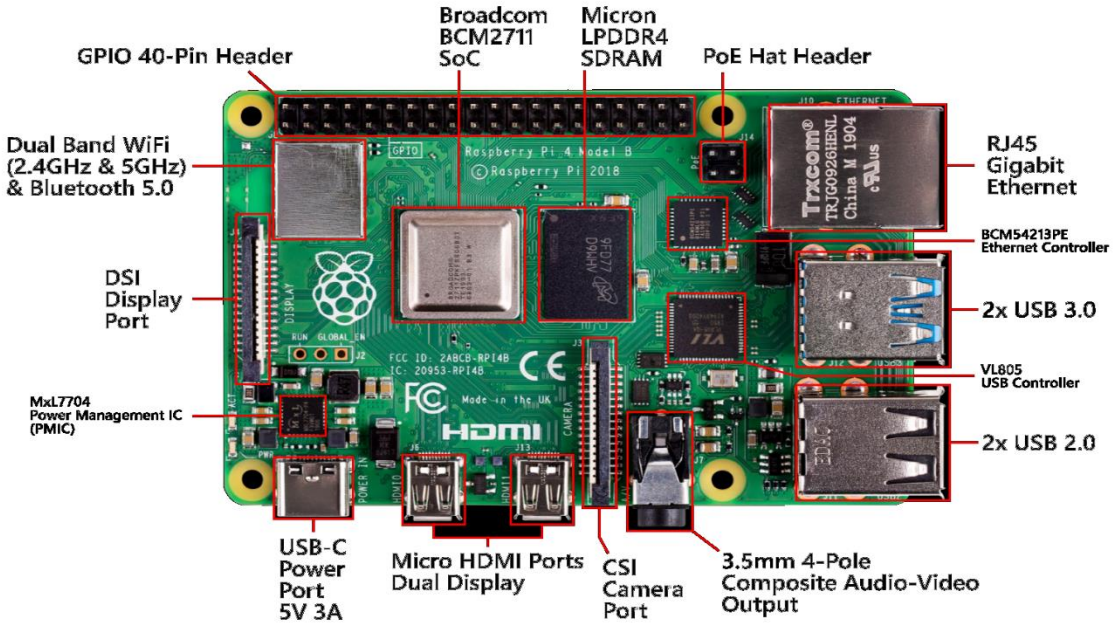


Рисунок 1 – Типовий вигляд плати Raspberry Pi 4

Мовленнєві сигнали, що надходять від користувача, спочатку проходять етап попередньої обробки, який включає нормалізацію рівня гучності, фільтрацію шумів та виділення характеристичних ознак аудіосигналу. Для цього використовуються мікрофонні масиви та USB-аудіоінтерфейси, які забезпечують достатню якість вхідного звуку навіть у складних акустичних умовах. Додатково система може автоматично коригувати рівень чутливості мікрофонів залежно від рівня шуму у кімнаті, що підвищує надійність розпізнавання. Далі аудіопотік обробляється за допомогою відповідної мовної моделі, наприклад Vosk або PocketSphinx, що працює локально та забезпечує швидке та точне розпізнавання ключових фраз.

Такий підхід дозволяє мінімізувати затримки між промовленою командою та її виконанням, що значно покращує користувацький досвід. Після інтерпретації голосової інструкції система переходить до етапу виконання команди. Реалізований програмний модуль визначає, який саме пристрій потрібно активувати або деактивувати, і за допомогою апаратних інтерфейсів Raspberry Pi здійснює керування освітленням, реле, сигнальними модулями, мультимедійними системами або іншими компонентами «розумного дому». Для цього використовуються GPIO-виводи, Wi-Fi або Bluetooth-з'єднання, а також додаткові контролери, що дозволяють інтегрувати систему в існуючу домашню інфраструктуру без потреби повної її модернізації [3]. Крім того, система підтримує налаштування складних сценаріїв автоматизації, наприклад, одночасне керування кількома пристроями або виконання дій у певний час доби, що робить її більш універсальною та функціонально багатою.

Під час розробки важливим етапом стало тестування системи в реальних умовах експлуатації. Було визначено, що якість розпізнавання значно залежить від рівня сторонніх шумів, відстані до джерела мовлення та характеру приміщення. Для підвищення стабільності роботи застосовувалися методи шумозаглушення, корекція чутливості мікрофона, а також оптимізація моделей розпізнавання під конкретні типові команди користувача. У майбутньому передбачається використання адаптивних алгоритмів, які будуть навчатися на голосі конкретного користувача, що ще більше підвищить точність та швидкість реагування системи.

Для наочного відображення ефективності роботи системи наведені результати тестування в різних умовах, поданих в таблиці 1 та 2.

Таблиця 1 – Точність розпізнавання команд залежно від відстані

Відстань до мікрофона	Точність розпізнавання (%)
3 м	98%
4 м	94%
5 м	87%
6 м (шумне середовище)	72%

Таблиця 2 – Вплив рівня шуму на точність розпізнавання

Рівень шуму	Приклад умов	Точність (%)
Низький	Тиха кімната	97%
Середній	Робота вентилятора	88%
Високий	Телевізор/музика	69%

Додатково, аналіз таблиць показав, що найкращі результати досягаються при використанні спрямованих мікрофонів, а недорогі всеспрямовані моделі знижують точність у шумних умовах. Оптимальна відстань для стабільного розпізнавання голосу становить до 3 м. Після оптимізації моделей та фільтрації шумів точність системи зросла в середньому на 12–15% у складних умовах.

Окремо слід відзначити можливість масштабування розробленої системи. Відкрита архітектура Raspberry Pi та гнучкість програмних бібліотек дозволяють розширювати систему новими функціями, підключати додаткові модулі, створювати складні автоматизовані сценарії та інтегрувати компонент розпізнавання голосу з іншими сервісами. Такий підхід забезпечує універсальність рішення та робить його придатним для подальших досліджень і практичних застосувань у сфері домашньої автоматизації [4]. Крім того, система може бути легко інтегрована з хмарними платформами або іншими IoT-пристроями, що дозволяє створювати єдину мережу «розумного дому» та віддалено контролювати її через смартфон або планшет.

Також, система може бути розширена для використання мікрофона з мобільного телефону через Bluetooth-з’єднання. У такому випадку телефон виступає як бездротовий аудіо-пристрій, передаючи мовні сигнали на Raspberry Pi. Це дозволяє користувачу не залежати від стаціонарних мікрофонів або спеціального обладнання, а також забезпечує більшу мобільність у використанні системи голосового керування. Аудіопотік з телефону надходить на Raspberry Pi через стандартні аудіопрофілі Bluetooth, після чого обробляється так само, як сигнал із локального мікрофона. Такий підхід зберігає точність розпізнавання та дозволяє інтегрувати систему у більш гнучке середовище домашньої автоматизації, забезпечуючи користувачу можливість керувати побутовими пристроями з будь-якої точки приміщення, де доступний Bluetooth-зв’язок. Варто зазначити, що для мінімізації затримки та забезпечення стабільності роботи рекомендується використовувати профілі гарнітури (HSP/HFP), які оптимізовані під голосові команди, на відміну від музичних профілів A2DP, де може виникати більша затримка сигналу. Таким чином, можливість використання телефону як мікрофона робить систему більш універсальною та зручною для повсякденного користування.

Окрім розширення апаратних можливостей, важливим напрямком удосконалення системи є оптимізація програмного коду та зменшення затримок під час виконання голосових команд в офлайн-режимі. Завдяки локальній обробці мовлення можна мінімізувати час від появи команди до її фактичного виконання, а оптимізація алгоритмів дозволяє пришвидшити реакцію системи без втрати точності. Поліпшення включають модернізацію обробки аудіопотоку, зменшення навантаження на процесор Raspberry Pi та адаптацію мовної моделі до обмеженого набору команд, що значно пришвидшує розпізнавання. Додаткові тести, проведені під час дослідження, показали, що після оптимізації середня затримка виконання команди скорочувалася до 0.4–0.6 секунди, що є комфортним показником для домашньої автоматизації. Такі результати свідчать про високий потенціал системи до подальшого вдосконалення продуктивності шляхом роботи з мовними моделями, оптимізації програмних модулів та налаштування апаратних ресурсів для забезпечення максимально швидкої і стабільної реакції на голосові інструкції.

Додаткову увагу в межах проекту приділено питанню безпеки роботи голосової системи, оскільки керування побутовими пристроями потребує запобігання випадковим або небажаним активаціям. Зокрема, передбачено використання ключового активаційного слова, що мінімізує ризик помилкового розпізнавання у шумному середовищі. Окремі команди, пов'язані з критичними функціями, такими як увімкнення живлення високопотужних приладів або доступ до мультимедійних чи мережевих ресурсів, можуть бути обмежені для виконання без додаткової локальної перевірки. Такий підхід забезпечує більш надійну та контрольовану взаємодію з системою в умовах домашньої експлуатації.

Таким чином, реалізована система демонструє можливість ефективного використання одноплатного комп'ютера Raspberry Pi для організації голосового керування побутовими пристроями. Поєднання автономності, точності розпізнавання та широких можливостей апаратної взаємодії робить таке рішення конкурентоспроможним і перспективним у контексті розвитку Smart Home-технологій [5]. Додатково, система є відкритою для подальшого вдосконалення та модернізації, що дозволяє інтегрувати нові функції, алгоритми штучного інтелекту та сучасні стандарти безпеки, роблячи її універсальним інструментом для досліджень і впровадження інтелектуальних рішень у домашньому середовищі.

Висновки. Запропонована система розпізнавання голосових команд на базі Raspberry Pi довела свою ефективність як сучасне та гнучке рішення для побудови інтелектуальних інтерфейсів керування. Реалізована модель забезпечує повний цикл роботи з аудіосигналом: від його захоплення та попередньої обробки до подальшого розпізнавання команд і виконання відповідних дій підключеними пристроями. Практична реалізація показала, що обчислювальні можливості Raspberry Pi є достатніми для стабільної роботи алгоритмів голосового управління без необхідності використання дорогих апаратних платформ. Робота системи може здійснюватися як у локальному режимі, так і з розширеними можливостями через додаткові модулі зв'язку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Raspberry Pi Documentation. URL: https://www.raspberrypi.com/documentation/ (дата звернення 13.11.2025р.)

2. SpeechRecognition Library for Python. URL: https://pypi.org/project/SpeechRecognition/ (дата звернення 13.11.2025р.)

3. Monk, S. Raspberry Pi Cookbook (4th Edition). – Sebastopol, CA: O'Reilly Media, URL: https://archive.org/details/raspberrypicookb0000monk_x0t8 (дата звернення 15.11.2025р.)

4. Jurafsky D., Martin J. H. Speech and Language Processing (3rd Edition, Draft). – Stanford University, URL: https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3 (дата звернення 15.11.2025р.)

5. Богдан Ю., Зенів І.О. Технології Інтернету речей. – КПІ ім. І. Сікорського URL: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/dcd9e1aa-8bcc-4e76-b1e0-ed133bf616b2/content (дата звернення 16.11.2025р.)

УДК 004.383.2:621.391

Якимчук Н. М., Карпінський Н. К.
Луцький національний технічний університет
E-mail: n.yakymchuk@lntu.edu.ua

ОРГАНІЗАЦІЯ UART-КОМУНІКАЦІЇ В STM32 ДЛЯ СИСТЕМИ КОМУТАЦІЇ КІНЦЕВИХ ПРИСТРОЇВ

У статті досліджено апаратні та програмні аспекти організації асинхронної передачі даних у мікроконтролерах STM32 для створення системи комутації кінцевих пристроїв. Розглянуто підключення через USB-UART перетворювач FT232, конфігурацію інтерфейсу UART у середовищі STM32CubeMX та механізми забезпечення надійності обміну. Проведений аналіз демонструє можливість використання STM32 як комунікаційного вузла у телекомунікаційних застосуваннях.

Ключові слова: STM32, UART, комутація, FT232, телекомунікації.

N. M. Yakymchuk, N. K. Karpinsky. Organization of UART communication in STM32 for the terminal device switching system. The article investigates the hardware and software aspects of

organizing asynchronous data transmission in STM32 microcontrollers for building an end-device switching system. The study examines the connection via an FT232 USB-UART converter, the configuration of the UART interface in STM32CubeMX, and the mechanisms ensuring communication reliability. The analysis demonstrates that STM32 can effectively operate as a communication node in modern telecommunication applications.

Keywords: STM32, UART, switching, FT232, telecommunications.

Постановка проблеми. У сучасній науковій та технічній літературі значна увага приділяється проблемам організації надійного телекомунікаційного обміну між кінцевими пристроями на базі систем-на-кристалі. У працях, присвячених архітектурі STM32, детально описано апаратну реалізацію послідовних інтерфейсів, зокрема UART та USART, а також наведено їхні функціональні характеристики, що визначають можливості побудови комунікаційних модулів різного призначення [1; 2]. Дослідження програмної конфігурації периферії за допомогою засобів STM32CubeMX дозволяє розглядати мікроконтролери STM32 як гнучку платформу для побудови систем збору та маршрутизації даних у телекомунікаційних вузлах, де важливими є точність синхронізації, енергоефективність та надійність [4].

У наукових виданнях, присвячених вбудованим системам, автори наголошують на важливості оптимізації послідовної передачі даних у режимах з інтенсивним інформаційним навантаженням, а також аналізують механізми апаратної підтримки, які забезпечують мінімізацію затримок і помилок під час передавання повідомлень у режимі реального часу [5; 6]. Окремі праці звертають увагу на роль USB-UART перетворювачів як інтерфейсної ланки між мікроконтролером і комп'ютером, що є ключовим для дослідження процесів комутації кінцевих пристроїв у телекомунікаційних системах [3].

У галузевих публікаціях наведено аналіз ефективності асинхронних протоколів у структурі вбудованих мереж та підкреслено значення контролю помилок, коректності часових параметрів і адаптивності каналів передавання у складних телекомунікаційних умовах [7]. Це підтверджує потребу у комплексному дослідженні комутаційних механізмів, що базуються на UART-інтерфейсі STM32, з урахуванням апаратної специфіки, програмної конфігурації та реальних умов експлуатації.

Проведений огляд свідчить, що, незважаючи на широкий спектр доступних інструментів та технічної документації, питання інтегрованої організації каналу комутації для кінцевих пристроїв з використанням STM32 у ролі комунікаційного вузла лишається актуальним. Особливої уваги потребує дослідження стабільності, детермінованості та відмовостійкості UART-каналу, оскільки саме ці параметри визначають надійність роботи сучасних телекомунікаційних систем.

Метою дослідження є аналіз апаратних та програмних засобів організації UART-комунікації в STM32 та оцінювання її придатності для системи комутації кінцевих пристроїв.

Основний матеріал дослідження. Апаратна організація асинхронного зв'язку між мікроконтролером STM32 і персональним комп'ютером є фундаментально важливою для побудови телекомунікаційних систем низького та середнього рівня складності. Інтерфейс UART, реалізований апаратно у всіх сучасних контролерах STM32, забезпечує простий і надійний канал обміну між вузлами, де дані передаються у вигляді послідовного потоку бітів. Оскільки персональні комп'ютери не мають фізичного UART-порту, використовується USB-UART перетворювач, найпоширенішим варіантом якого є мікросхема FT232R. Її застосування дозволяє сформувати універсальний міст між TTL-рівнями мікроконтролера та USB-інтерфейсом ПК.

На рисунку 1 подано схему, у якій сигнальні лінії TX і RX STM32 з'єднуються безпосередньо з відповідними входами FT232R. Лінія TX мікроконтролера спрямована на RX перетворювача, що забезпечує коректний напрям потоку даних, тоді як сигнальна лінія RX контролера отримує інформацію з TX FT232R. Додатково використовуються загальна шина живлення та спільна точка землі, що гарантує правильність рівнів сигналів і завадостійкість каналу.

Таке підключення реалізує базову модель асинхронної взаємодії, в якій обмін даними відбувається без зовнішнього тактового сигналу, а синхронізація забезпечується тривалістю бітів та структурою кадру UART.

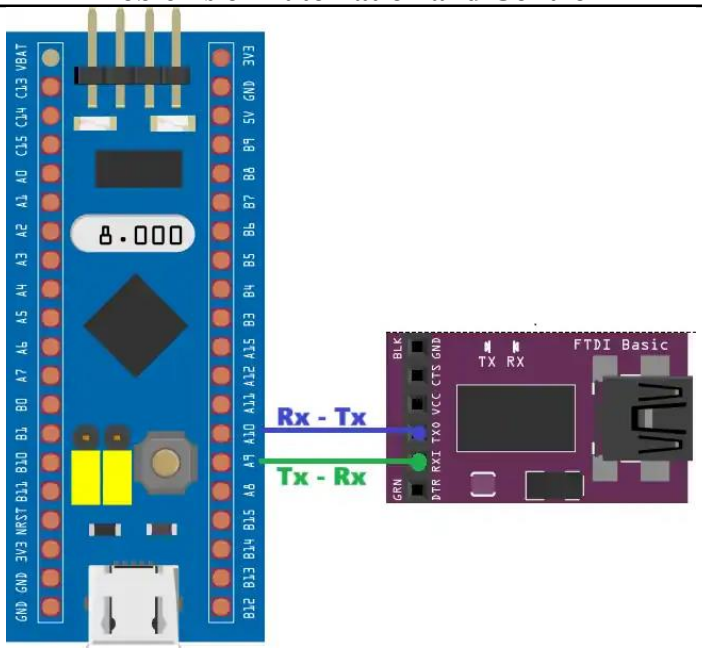


Рисунок 1 – Зв'язок між MCU та FT232 USB за допомогою UART конвертера

Інтерфейс UART є одним з ключових засобів обміну між STM32 та периферійними модулями. Його апаратна реалізація включає буферизацію, генерацію переривань та можливість використання DMA, що зменшує навантаження на ядро мікроконтролера та забезпечує стабільність передавання даних у системах реального часу. У контексті підключення через FT232R ці переваги дозволяють формувати надійний послідовний канал для конфігурації модуля, збору телеметрії, передавання параметрів або діагностичної інформації у телекомунікаційних вузлах.

Згідно з практичними рекомендаціями, конфігурація UART повинна відповідати параметрам, які встановлені драйвером FT232R, зокрема швидкості передачі, кількості бітів даних та стоп-бітів. На комп'ютері FT232R створює віртуальний COM-порт, а STM32 виступає в ролі джерела або приймача даних, що надходять у ASCII-форматі. Такий спосіб з'єднання широко застосовується в системах тестування, відлагодження та передачі керуючих команд.

Особливу увагу слід приділити електричній сумісності. UART у STM32 працює на рівнях 3.3 В, тому FT232R повинен бути налаштований на аналогічну напругу живлення або містити логічний перетворювач. Наявність неправильно узгоджених рівнів може призвести до помилок передачі або апаратних збоїв, що є критичним для телекомунікаційних систем. У реальних застосуваннях додатково враховують вплив завад, довжину ліній передачі та можливість екранізації кабелю.

Коректне функціонування телекомунікаційного вузла на базі STM32 забезпечують програмні механізми, зокрема середовище STM32CubeMX. В умовах побудови системи комутації кінцевих пристроїв базовим елементом є модуль, що здатний приймати, обробляти та передавати інформаційні пакети у вигляді послідовних телеметричних або керуючих повідомлень. Саме інтерфейс UART виступає фундаментальним каналом комунікації, а його конфігурація визначає якість взаємодії у системі. Передавання даних у STM32 реалізується через апаратний блок USART, який у асинхронному режимі виконує функції UART, забезпечуючи формування кадру з урахуванням стартового біта, інформаційних бітів, бітів парності та стоп-біта. Вибір цих параметрів є критичним для уникнення помилок і узгодження мікроконтролера з USB-UART перетворювачем FT232R. Саме тому першим кроком налаштування є синхронізація швидкості передачі та формату кадру з параметрами віртуального COM-порту, створеного комп'ютером.

У середовищі STM32CubeMX процес конфігурації починається з активації периферії USARTx у режимі Asynchronous. Після вибору частоти тактування шини та налаштування мультиплексування виводів TX і RX середовище автоматично генерує код ініціалізації, у якому фіксуються встановлені параметри. Це дозволяє зменшити ймовірність помилок, що виникають при ручному програмуванні регістрів, і забезпечує уніфікованість конфігурації для різних серій STM32. Важливим кроком є визначення функцій, які керуватимуть передаванням та прийманням даних. У бібліотеці HAL передбачено використання функцій блокуючого, неблокуючого та DMA-режимів. Кожен із них має свої переваги залежно від вимог телекомунікаційного застосування. У простих системах комутації доцільно використовувати блокуючий режим, оскільки він забезпечує повну

завершеність передачі перед переходом до наступної операції. У більш складних системах, які одночасно обробляють декілька потоків комунікаційних подій, ефективнішими є неблокуючі або DMA-підходи.

Передавання інформації у UART-каналі базується на формуванні буфера даних та ініціації функції надсилання, яка перетворює масив байтів у послідовність бітів відповідно до встановленої структури кадру. Прийом даних реалізується за аналогічним принципом, однак потребує ретельнішого контролю помилок, оскільки у телекомунікаційних мережах можливі завади, нестабільність сигналу або порушення таймінгів. Застосування пріоритетних переривань дозволяє миттєво реагувати на появу нового байта у приймальному регістрі, що є важливим у системах, де одночасно обробляються команди комутації та інформаційні повідомлення. Цей підхід дає змогу уникнути втрати даних і забезпечити детерміновану реакцію мікроконтролера навіть у випадку інтенсивного інформаційного навантаження.

Особливого значення набуває механізм DMA, який дозволяє автоматично передавати блоки даних між пам’яттю та UART-периферією без участі центрального процесора. Така можливість суттєво підвищує продуктивність системи комутації, оскільки ядро STM32 звільняється для виконання задач маршрутизації, аналізу команд або керування периферійними модулями. DMA мінімізує затримки та забезпечує сталість швидкості передачі, що важливо в умовах багатоканальної телекомунікаційної архітектури. Використання DMA-підходу особливо доцільне, коли передаються структуровані пакети, у яких STM32 виконує роль вузлового комутатора та повинен перенаправляти отримані повідомлення іншим пристроям.

Дослідження системи комутації кінцевих пристроїв на базі STM32 вимагає проведення аналізу надійності обміну та особливостей функціонування асинхронного каналу в умовах реальних телекомунікаційних навантажень. Після апаратного підключення та програмної конфігурації UART важливо оцінити стабільність передачі, точність синхронізації та здатність системи своєчасно реагувати на зміни стану лінії. У практичних реалізаціях робота каналу визначається структурою кадру UART, де помилки можуть виникати внаслідок некоректної тривалості біта, завад або перевищеної тривалості затримки між байтами. Мікроконтролери STM32 містять апаратні механізми виявлення таких порушень, включаючи контроль парності, детекцію framing error та overrun error, що дозволяє формувати детермінований канал комунікації навіть у складних умовах роботи.

У системах комутації суттєве значення має своєчасність обробки даних, оскільки затримки можуть спотворювати логіку взаємодії між вузлами мережі. Для мінімізації таких ризиків процес прийому зазвичай організовується через переривання або DMA, що дає змогу виключити пропуски даних і забезпечити постійну готовність приймача. Важливою є також узгодженість швидкості передачі між STM32 та FT232R, оскільки навіть невеликі відхилення тактових частот можуть спричинити накопичення похибок у довгих сеансах обміну. Окрім цього, при побудові телекомунікаційного вузла необхідно враховувати електричні параметри лінії, включаючи рівень напруги, довжину провідника та чутливість до електромагнітних завад, що особливо актуально для комутаційних модулів, де одночасно працюють кілька інтерфейсів.

Для підтвердження теоретичних положень було проведене дослідження, у вигляді у створенні локального комунікаційного вузла на базі STM32, підключеного до ПК через FT232 та до периферійних модулів через UART. Мікроконтролер приймав дані, аналізував їх зміст і переспрямовував відповідним пристроям, моделюючи роботу маршрутизатора. Експеримент проводився на STM32F103 з використанням двох UART-каналів: UART1 для з’єднання з ПК через FT232 та UART2 для підключення периферійного модуля. Швидкість передачі встановлювали 115200 бод, розмір пакета – 16 байт. Під час експерименту оцінювали стабільність прийому, швидкодію обробки та коректність пересилання пакетів у режимі реального часу. Особливу увагу приділяли відсутності втрат даних та відповідності реакції STM32 часовим вимогам комутаційного процесу. Особливу увагу під час експериментального дослідження було зосереджено на здатності STM32 виконувати роль маршрутизуючого елемента в локальній системі комутації. Результати показали повну відсутність пропусків кадрів, коректну маршрутизацію та стійкість роботи каналу протягом тривалого тестування.

Завдяки поєднанню апаратної підтримки UART, гнучкості програмної конфігурації та можливості послідовної обробки даних, мікроконтролер забезпечив стабільне переспрямування повідомлень між кінцевими вузлами. Це підтверджує перспективність використання STM32 як основи для малогабаритних комунікаційних систем, у яких важливими є енергоефективність, надійність та адаптивність. Проведений аналіз демонструє, що за належної конфігурації UART-

підсистеми STM32 здатний функціонувати як універсальний комунікаційний модуль, здатний інтегруватися у ширші телекомунікаційні структури.

Висновки. Проведений аналіз засвідчив, що інтерфейс UART у поєднанні з мікроконтролером STM32 та FT232 забезпечує стійкий асинхронний канал зв'язку, придатний для використання у системах комутації кінцевих пристроїв. Завдяки апаратній підтримці переривань і DMA, а також можливості гнучкої конфігурації UART через STM32CubeMX, мікроконтролер забезпечує низькі затримки й високу надійність обміну. Отримані результати підтверджують ефективність STM32 як комунікаційного вузла в локальних телекомунікаційних системах та його перспективність для побудови маршрутизуючих модулів різного рівня складності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. STMicroelectronics. RM0008. Reference manual. STM32F101xx, STM32F102xx, STM32F103xx, STM32F105xx and STM32F107xx advanced Arm®-based 32-bit MCUs. Rev., 2018. URL: https://www.st.com.

2. STMicroelectronics. AN4908. Getting started with USART automatic baud rate detection for STM32 MCUs. Rev. 8, 2024. URL: https://www.st.com/resource/en/application_note/an4908-getting-started-with-usart-automatic-baud-rater-detection-for-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf.

3. STMicroelectronics. UM1850. Description of STM32F1 HAL and low-layer drivers (STM32CubeF1 user manual). 2020. URL: https://www.st.com.

4. STMicroelectronics. AN2548. Introduction to DMA controller for STM32 MCUs. Rev. 9, February 2024. URL: https://www.st.com/resource/en/application_note/an2548-introduction-to-dma-controller-for-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf.

5. Future Technology Devices International Ltd. FT232R. USB UART IC Datasheet. DS_FT232R, 2024. URL: https://ftdichip.com

6. Zang F., Niu H. Design and Implementation of High Speed UART Based on DMA. Proc. 3rd Int. Conf. on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME). 2018. DOI:10.2991/eame-18.2018.26.

7. Bardis N. Synchronization error correction for asynchronous channels data transmission. ITM Web of Conferences (AMCSE 2017), 2017. DOI: 10.1051/ itmconf/201 7090 3007.

УДК 004.942:621.3

Якимчук Н. М., Лишук В. В.
Луцький національний технічний університет
E-mail: n.yakymchuk@lntu.edu.ua

МЕТОДОЛОГІЯ ІНТЕГРОВАНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА СПІЛЬНОГО ПРОЄКТУВАННЯ В СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМАХ

У статті досліджено взаємозв'язок між процесами моделювання та спільного проєктування в сучасних гетерогенних електронних системах. На основі аналізу актуальних джерел, методологій IEEE HIR та практичних підходів багатофізичного моделювання показано ключові обмеження існуючих робочих потоків, а також перспективи їх інтеграції. Обґрунтовано потребу у стандартизації даних, калібруванні моделей та поєднанні MBSE, цифрових двійників і ко-симуляції для підвищення надійності та скорочення апаратних ітерацій.

Ключові слова: моделювання; спільне проєктування; гетерогенна інтеграція; багатофізичні моделі; цифровий двійник.

N. M. Yakymchuk, V. V. Lyshuk. Methodology of integrated modeling and joint design in modern electronic systems. This article examines the relationship between modeling and co-design processes in modern heterogeneous electronic systems. Based on an analysis of current literature, IEEE HIR methodologies, and practical multi-physics simulation approaches, the study highlights limitations of existing workflows and outlines opportunities for their integration. The findings emphasize the need for data standardization, model calibration, and the combined use of MBSE, digital twins, and co-simulation to improve system reliability and reduce hardware iteration cycles.

Keywords: modeling; co-design; heterogeneous integration; multiphysics modeling; digital twin

Постановка проблеми. Сучасні електронні системи стають дедалі складнішими, що зумовлюється швидкою еволюцією технологій 2.5D – 3D-інтеграції, зростанням щільності компонентів і посиленням міждоменних (електричних, теплових, механічних, оптичних) взаємодій, що робить традиційні розділені робочі потоки моделювання, симуляції та проектування неефективними та ризикованими для складних продуктів [1]. Подолання цього розриву визначає ефективність інженерних рішень майбутнього.

Сучасні підходи до вирішення проблеми сумісності і спільного проектування охоплюють широкий спектр ідей і методів, але не дають досконалих інструментів для практичної реалізації в межах повного циклу. Практичні приклади спільного проектування (co-design) [2, 3] демонструють ефективність ко-симуляції для RF-систем, проте такі підходи часто потребують значних обчислювальних ресурсів і складної інтеграції інструментів. Огляди багатофізичних симуляцій [4] і дослідження ефектів одиночних подій SEEs [5] ілюструють технічні методи багатомасштабного моделювання, але вказують на проблеми верифікації та невизначеності параметрів. Теоретичні огляди з ко-симуляції [6] виписують таксономію підходів і проблем інтерфейсів; проте вони вказують на заявку стандартів, якої наразі немає. Сучасні концепції цифрових двійників і data-driven пришвидшення багатофізичних симуляцій [7] пропонують перспективні підходи, але потребують валідації в індустріальному середовищі. Отже, незважаючи на помітний прогрес, існує потреба в узгоджених інтерфейсах даних, методах калібрування моделей на основі метрології процесів, обчислювально ефективних схемах ко-симуляції та інтеграції MBSE із CAE/EDA потоками і можуть бути предметом перспективних досліджень майбутнього.

Метою цієї роботи є розробка методології інтегрованого моделювання та спільного проєктування (co-design) для сучасних гетерогенних електронних систем, яка дозволить знизити невизначеність при переході від поведінкових моделей до фізичної реалізації, підвищити прогнозованість показників продуктивності й надійності та скоротити число апаратних ітерацій.

Основний матеріал дослідження. Моделювання та симуляція в електроніці протягом останніх десятиліть зазнали суттєвої трансформації, що пов’язано як зі зростанням складності інтегрованих схем, так і з переходом від окремих компонентних рішень до високоінтегрованих гетерогенних систем. У сучасній інженерній практиці моделювання перестає бути ізольованим інструментом для аналізу електричних параметрів окремих елементів і перетворюється на комплексну багатофізичну платформу, що охоплює електричні, теплові, оптичні, механічні та матеріалознавчі процеси. Саме така багатофізична інтеграція визначає логіку розвитку підходів, викладених у високорівневих рекомендаціях IEEE Heterogeneous Integration Roadmap (HIR) [1], які підкреслюють необхідність одночасного врахування всіх взаємодій між рівнями «пристрій – упаковка – система».

Сучасні тенденції розвитку електронної інженерії вказують на неможливість ефективного проєктування складних систем у випадку, коли рівні «пристрій», «упаковка» та «система» розробляються ізольовано (рис. 1). Традиційні підходи, характерні для початку 2000-х років демонструють фрагментованість процесу. Кожен рівень має власну базу даних, окремі інструменти аналізу та відокремлений цикл проєктування, що створює значний бар’єр для обміну інформацією між етапами. Така ізольованість уповільнює оптимізацію, спричиняє дублювання робіт і збільшує ймовірність конструктивних помилок, які проявляються лише на пізніх етапах розробки.

Одним із ключових викликів сучасної електроніки є те, що фізичні процеси в реальних конструкціях значною мірою взаємопов’язані. Теплові градієнти безпосередньо впливають на провідність матеріалів та швидкодію транзисторів, механічні напруження змінюють параметри контактів та інтерконектів, а високочастотні електромагнітні поля породжують індуктивні та паразитні ефекти, які впливають на якість сигналу та енергоспоживання.

Сучасні моделі доповнюються також багатомасштабними симуляціями, які дозволяють пов’язувати локальні мікро- та нанорівневі явища із поведінкою всієї системи [7]. На матеріальному рівні моделі описують параметри заряду, теплову провідність або процеси деградації, такі як електроміграція чи термічна втома. На рівні упаковки інструменти моделювання аналізують поведінку інтерконектів, TSV-структур, органічних підкладок та теплових шляхів відведення енергії. На системному рівні симуляції розглядають електромагнітну сумісність, інтеграцію підсистем, поведінку живлення та надійність у реальних сценаріях експлуатації. Використання багатомасштабних моделей створює основу для ко-симуляції, у якій результат на одному рівні безпосередньо впливає на поведінку вищого та нижчого рівнів.

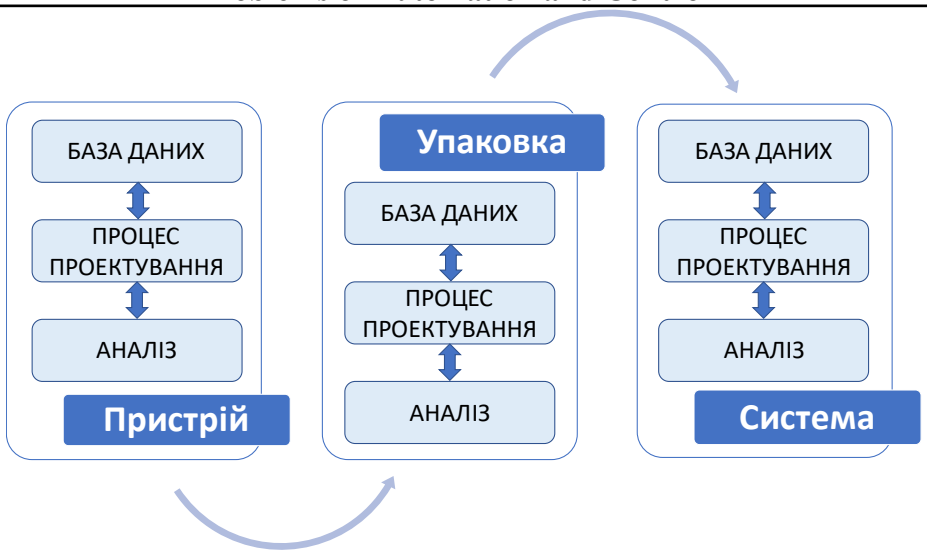


Рисунок 1 – Традиційний підхід потокового проектування

Особливістю сучасного підходу є необхідність стандартизованої платформи даних, що охоплює характеристики пристроїв, технологічні параметри та умови експлуатації. Така уніфікація баз даних дає змогу уникнути втрат інформації при переході між етапами проєктування та дозволяє створювати спільні моделі, які відображають повну картину поведінки електронної системи. Інтегровані моделі не лише підвищують точність прогнозів, але й дозволяють перейти від реактивного до проактивного проєктування, коли потенційні проблеми визначаються ще до того, як конструкція переходить у стадію фізичної реалізації.

Отже, у контексті гетерогенної інтеграції та високої щільності компонування традиційний підхід стає критично застарілим. Малі габарити кристалів, багатошарові органічні плати, складні маршрути тепловідведення, мікросмужкові або TSV-інтерконекти, взаємодія електромагнітних полів та нерівномірні механічні напруження вимагають єдиного циклу оптимізації (рис. 2).

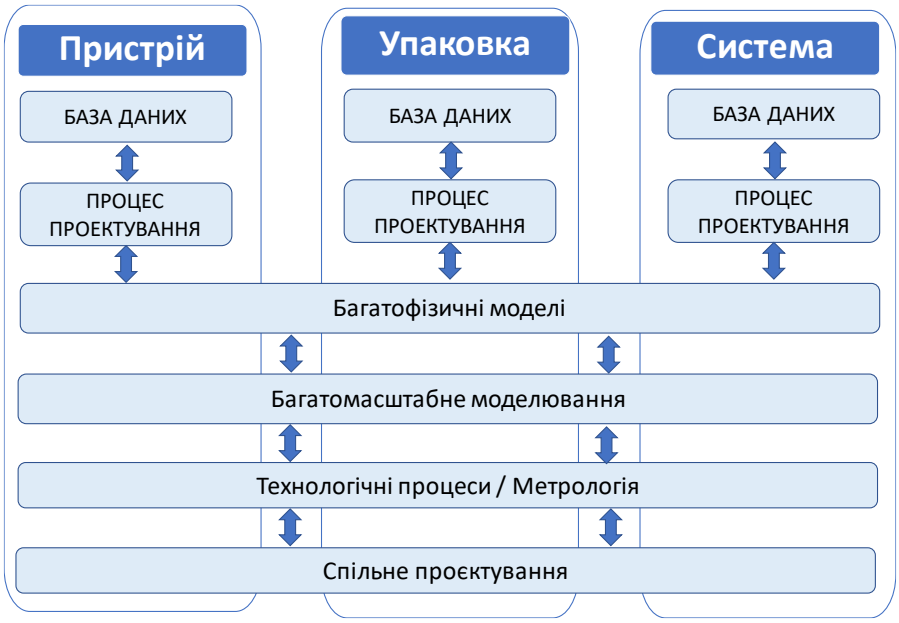


Рисунок 2 – Гетерогенний підхід до проектування складних систем

Центральним елементом є мультифізичні моделі, що охоплюють електричні, оптичні, теплові, механічні та матеріальні ефекти. Їхнє поєднання забезпечує коректне врахування взаємодії фізичних явищ, які раніше аналізувалися окремо. Блок багатомасштабної симуляції забезпечує зв'язок між мікроскопічними моделями поведінки матеріалів, структурним аналізом упаковки та системною симуляцією електронного модуля. Такий підхід дозволяє отримати повноцінний прогноз

продуктивності та надійності, включно з електроміграцією, механічною втомою, коливаннями температури та деградацією з'єднань.

Інтеграційним елементом, що поєднує моделі та дані, є спільні технологічні процеси та метрологія, які встановлюють стандарти для обміну параметрами між різними етапами проєктування. Це означає, що дані про пристрій надходять безпосередньо у моделі упаковки, а результати термомеханічного аналізу упаковки одразу впливають на системні моделі сигналів, живлення та електромагнітної сумісності. Такий підхід формує основу для технології ко-дизайну (Co-Design), що розглядається вже не як послідовність етапів, а як інтегрований процес оптимізації. Ця концепція охоплює кілька ключових елементів: глобальну оптимізацію, стандартизований обмін даними, спільне моделювання та врахування факторів DFX (технологічність виготовлення, надійність, тестування тощо). Функціонування цього рівня вимагає узгодженості форматів, алгоритмів оптимізації і методів оцінки надійності між різними інженерними групами. У результаті дизайнер мікросхеми враховує обмеження упаковки, спеціаліст з упаковки має доступ до системних вимог, а системний інженер може аналізувати поведінку на рівні мікроструктурних моделей.

Перехід від ізольованого проєктування до інтегрованої платформи приводить до значного підвищення точності, швидкості розробки та передбачуваності поведінки електронних систем. Він забезпечує зменшення кількості ітерацій, скорочення часу виходу на ринок і покращення показників надійності.

Сучасні освітні програми, що відповідають галузі повинні звернути увагу на активніше інтегрування методів моделювання та цифрового проєктування (CAE/EDA) як базових компонент підготовки фахівців. Така інтеграція зумовлена тим, що промислові цикли розроблення електронних систем сьогодні повністю залежать від точності симуляцій, коректності спільного моделювання, а також від уміння інженера використовувати віртуальні прототипи для скорочення часу створення системи. Освітні курси повинні адекватно відображати цю тенденцію, забезпечуючи студентам можливість опанувати єдину логіку переходу від моделі до фізичної реалізації.

У стандартних навчальних планах фундаментальні дисципліни мають тенденції до поєднання з прикладними курсами, що включають сучасні інструменти EDA. Ці інструменти охоплюють Spice-подібні симулятори, середовища для моделювання високорівневих систем (MATLAB/Simulink), засоби автоматизації проєктування друкованих плат (Altium, KiCad), платформи для тривимірної мультифізичної симуляції (COMSOL, Ansys). Важливо, що освітні програми спрямовані не лише на відтворення інженерної практики, а й на формування дослідницької компетентності: студенти мають навчитися аналізувати вплив параметрів моделі на фактичні технічні характеристики, оцінювати точність моделювання та знаходити компроміси між складністю моделі і швидкістю симуляції.

На відміну від традиційного підходу, де моделювання розглядалося як допоміжний інструмент, сучасні курси підкреслюють його роль як обов'язкової частини проєктного мислення. Такий процес формує системне розуміння причинно-наслідкових зв'язків між ідеальною поведінкою, симульованою в середовищі, і реальною роботою електронного вузла. Студенти також опановують методологію «моделювання заради прийняття рішень», яка дозволяє оцінити ризики, пов'язані з вибором компонентів, технологій монтажу або вимог до електроживлення.

Результатом має стати здатність студента не лише застосовувати інструменти моделювання та симуляції, а й аргументувати вибір фізичних моделей, враховуючи взаємний вплив електричних, теплових, механічних та оптичних процесів.

Для максимальних результатів доцільно розглянути впровадження співвідношення 40 % теоретичного матеріалу та 60 % практичної роботи, де принаймні 25 % усієї програми становить спільне проєктування, виконане у малих групах. Для оцінювання пропонується трирівнева шкала: 50 % базова коректність моделей та симуляцій, 30 % здатність оптимізувати систему за кількома фізичними параметрами, 20 % оцінка інноваційності та оригінальності проєктного рішення. Такі критерії дозволяють не просто вимірювати технічну грамотність, а й формувати дослідницьке мислення. Важливо, щоб студенти самі обирали, яку фізичну взаємодію досліджувати глибше: електро-термічні взаємозв'язки, механічні напруження або обмеження друкованих плат.

Моделювальна інфраструктура курсу може бути організована у форматі послідовних рівнів складності: на 1–3 тижні студент працює зі «статичними» моделями; з 4–8 тижня переходить до комп'ютерного моделювання та симуляцій, а на 9–12 тижні виконує спільне моделювання із залученням двох доменів. Таке поетапне зростання складності створює імітацію реального процесу дослідження-розробка. На фінальному етапі «імітаційній співбесіді», кожен учасник групи має обґрунтувати вибір технології виготовлення або збірки системи на основі результатів власного

моделювання. Цінним показником є рівень внутрішньої аргументованості: якщо студент може обстояти свою модель у дискусії протягом трьох хвилин, проєкт вважається «професійно сформованим».

Щоб активізувати креативність, пропонується система бонусних балів: максимальні +10 % до оцінки отримує студент, який пропонує нестандартне моделювання, наприклад, модифікацію температурного профілю у реальному часі або врахування обмежень реального PCB-розташування. При цьому очікувано, що лише близько 15–20 % групи щороку здатні на такі рішення, однак саме ця статистика формує показник інноваційності курсу. Окрема увага приділяється роботі з невизначеністю: допускається на 5 % більша похибка симуляції за умови, що студент пояснює джерело помилки. Таким чином виховується здатність до критичного аналізу. Запропонована методологія перетворює викладання на спільне лабораторне дослідження і поступово формує «мислення інтегрованого інженера», що є центральним викликом наступних 5–15 років для розвитку гетерогенних електронних систем.

Загалом інтеграція моделювання та проєктування в освітніх програмах забезпечує формування спроможності студентів працювати в умовах складних системних проєктів, характерних для сучасної електронної промисловості. Це не лише скорочує «розрив» між освітою та реальною інженерною практикою, але й створює середовище, у якому майбутні фахівці можуть апробувати ідеї та алгоритми, аналізувати проєктні ризики та ухвалювати технічні рішення, адаптовані до сучасних технологічних процесів.

Висновки. Проведений аналіз показав, що інтегроване використання моделювання і спільного проєктування є критично важливим для створення сучасних гетерогенних електронних систем, де зростають багатофізичні взаємодії та технологічна складність. Виявлено, що існуючі підходи залишаються фрагментованими, а відсутність узгоджених стандартів даних і каліброваних моделей обмежує точність прогнозування. Інтеграція багатомасштабних симуляцій, MBSE та цифрових двійників формує перспективний напрям, здатний скоротити апаратні ітерації та підвищити надійність систем. Отримані висновки підкреслюють важливість формування узгоджених методологій co-design для розвитку електроніки нового покоління.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Heterogeneous Integration Roadmap (HIR). Modeling and Simulation. IEEE Electron Devices Society, 2019. 19. URL: https://eps.ieee.org/images/files/HIR_2019/HIR1_ch14_sim.pdf

2. Issakov V., Wojnowski M., Knapp H., Trotta S., Förstner H.-P., Pressel K., Hagelauer A. Co-simulation and Co-design of Chip-Package-Board Interfaces in Highly-Integrated RF Systems. Proceedings of the IEEE Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting (BCTM). 2016. PP. 94-101. DOI: 10.1109/BCTM.2016.7738959.

3. Okabe K., Jeewan H.P., Yamagiwa S., Kawano T., Ishida M., Akita I. Co-Design Method and Wafer-Level Packaging Technique of Thin-Film Flexible Antenna and Silicon CMOS Rectifier Chips for Wireless-Powered Neural Interface Systems. Sensors. 2015. Vol.15, №12. PP. 31821-31832. DOI: 10.3390/s151229885.

4. Wang X., Chen D., Li D., Kou C., Yang Y. The Development and Progress of Multi-Physics Simulation Design for TSV-Based 3D Integrated System. Symmetry. 2023. Vol.15, № 2, Art.418. DOI: 10.3390/sym15020418.

5. Autran J.L., Munteanu D. Multi-scale, Multi-physics Modeling and Simulation of Single Event Effects in Digital Electronics: from Particles to Systems. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2023. DOI: 10.1109/TNS.2023.3337288.

6. Gomes C. Co-simulation: State of the art. arXiv:1702.00686, 2017. URL: https://arxiv.org/abs/1702.00686

7. Akundi A., Lopez V. A Review on Application of Model Based Systems Engineering to Manufacturing and Production Engineering Systems. Procedia Computer Science. 2021. Vol.185. PP. 101-108. DOI: 10.1016/j.procs.2021.05.011

СЕКЦІЯ «МІКРО- ТА НАНОСИСТЕМНА ТЕХНІКА»

УДК 621.7.077: 681.513.3
Денисюк В. Ю., Кравчук О. О.
Луцький національний технічний університет
E-mail: v.denysiuk@lntu.edu.ua

РОЗРОБЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ БАГАТОКООРДИНАТНИХ МІКРОМАНІПУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ ТОЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ НА ОСНОВІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ВИКОНАВЧИХ ПРИСТРОЇВ

У статті розглянуто питання підвищення точності мікропереміщень у багатокоординатних мікроманіпуляційних системах та проаналізовано сучасні підходи до створення багатокоординатних систем точного позиціонування, що використовуються у мікроскопічних, біомедичних та технологічних комплексах. Особливу увагу приділено класифікації предметних столиків і мікроманіпуляторів за типом руху, принципом приводу, конструктивними характеристиками та рівнем точності. Визначено перспективність застосування п'єзоелектричних виконавчих пристроїв для реалізації прецизійних переміщень у мікро- і наномасштабі. Запропоновано підхід до створення дворівневих за точністю систем, що поєднують модулі грубих і точних переміщень. Розроблені рекомендації можуть бути використані при проектуванні автоматизованих комплексів мікроманіпулювання та оптико-електронних систем дослідження мікрооб'єктів.
Ключові слова: мікроманіпуляційна система, точне позиціонування, п'єзоелектричний привід, багатокоординатний столик, мікроманіпулятор, нанопереміщення.

Denysiuk V., Kravchuk O. Development and analysis of multi-coordinate micromanipulation systems for precise positioning based on piezoelectric actuators. The article considers the issue of increasing the accuracy of micromovements in multi-coordinate micromanipulation systems and analyzes modern approaches to creating multi-coordinate precise positioning systems used in microscopic, biomedical and technological complexes. Particular attention is paid to the classification of stage stages and micromanipulators by type of movement, drive principle, design characteristics and level of accuracy. The prospects for using piezoelectric actuators for implementing precision movements on the micro- and nanoscale are determined. An approach to creating two-level accuracy systems that combine modules for coarse and fine movements is proposed. The developed recommendations can be used in the design of automated micromanipulation complexes and optoelectronic systems for studying microobjects.
Keywords: micromanipulation system, precise positioning, piezoelectric actuator, multi-coordinate stage, micromanipulator, nanodisplacement.

Постановка проблеми. З розвитком мікро- і нанотехнологій, мікро- та наносистемної техніки зростає потреба в пристроях для точного позиціонування мікрооб'єктів. Загальним для всіх дослідних і виробничих процесів є необхідність в системах керування взаємним позиціонуванням досліджуваного мікрооб'єкта або заготовки з робочим органом тестового, виробничого обладнання або інструментом. Важливу роль в таких системах керування грають сучасні виконавчі механізми – актюатори для мікро- та нанопозиціонування, побудовані на різних принципах дії. Від їх точності в основному залежить ефективність функціонування систем керування і точність позиціонування об'єктів.

Найбільш перспективними способами переміщення в нанопросторі є мікроманіпуляційні системи на базі п'єзоелектричних виконавчих пристроїв. Перехід на п'єзоелектричні виконавчі пристрої відкриває нові потенційні можливості для мікроманіпуляційних систем. А це в свою чергу пред'являє нові вимоги щодо точності мікропереміщень до основної кінематичної ланки таких систем – напрямної, яка трансформує параметри двигуна на робочий інструмент.

Тому створення автоматизованих комплексів для високоточних прецизійних мікроманіпуляційних систем з високоточними напрямними є життєво необхідним для реалізації мікротехнологій. Це обумовлює актуальність постановки задачі підвищення точності мікропереміщень п'єзоелектричних мікроманіпуляційних систем шляхом розроблення методики та побудови комп'ютеризованих засобів вимірювання лінійних та кутових переміщень їх складових

елементів на основі використання сучасних засобів накопичення та обробки відеоінформації з подальшою її обробкою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час у багатьох галузях промисловості з високими вимогами до точності. Багатокоординатні системи точного позиціонування часто використовуються в сучасній медичній і біологічній техніці. Вони, зокрема, призначені для переміщення і встановлення в певному положенні мікрооб'єкту в поле зору мікроскопа [1, 2]. Системи позиціонування можуть різнитися за своєю конструкцією і дозволяють переміщати мікрооб'єкт по вертикалі, горизонталі і здійснювати поворот мікрооб'єкту на певний кут з високою точністю [3, 4].

Для задач в області біології, медицини та електронного машинобудування, пов'язаних з роботою над мікрооб'єктами, ефективно використовувати п'єзоприводи на базі біморфних п'єзоактюаторів (БПА) з паралельною кінематикою [5, 6]. Тому модуль точних переміщень двокоординатного предметного столика для переміщення мікрооб'єктів повинен володіти компактністю, конструктивною простотою, достатньою для зазначених задач точністю і швидкодією, а також відносно низькою вартістю.

Мета роботи – підвищення точності мікропереміщень у мікроманіпуляційних системах шляхом розроблення структурно-функціональної моделі та методики побудови комп'ютеризованих засобів вимірювання лінійних і кутових переміщень складових елементів багатокоординатних систем точного позиціонування на основі сучасних засобів відеореєстрації та цифрової обробки зображень.

Викладення основного матеріалу. На сьогоднішній день у багатьох галузях промисловості з високими вимогами до точності, наприклад, при реалізації лазерних, плазмових та інших технологій виникає необхідність здійснювати точний і плавний рух робочого органу або оброблюваного об'єкта за необхідними траєкторіями [7, 9]. У цьому випадку мова йде про багатокоординні системи точного позиціонування. Крім того багатокоординатні системи точного позиціонування часто використовуються в сучасній медичній і біологічній техніці. Вони, зокрема, призначені для переміщення і встановлення в певному положенні мікрооб'єкту в поле зору мікроскопа. Системи позиціонування можуть різнитися за своєю конструкцією і дозволяють переміщати мікрооб'єкт по вертикалі, горизонталі і здійснювати поворот мікрооб'єкту на певний кут з високою точністю [9, 10].

Багатокоординатний робочий столик (рис. 1) є робочою поверхнею в конструкції мікроскопа, на якій встановлюється і кріпиться у певному положенні мікроскопічний препарат. Предметні столики у різних моделях мікроскопів можуть відрізнятися за своєю конструкцією та забезпечувати рух препарату по вертикалі, горизонталі або поворот на певний кут.



Рисунок 1 – Багатокоординатний робочий столик

У таблиці 1 подано класифікацію багатокоординатних робочих столиків.

Таблиця 1 – Класифікація багатокоординатних робочих столиків

Ознака	Група
Тип стола	Предметний стіл для прохідного світла
	Предметний стіл для відбитого світла
Габаритні розміри	Малі від 50×50 мм до 100×100 мм
	Середні від 100×100 мм до 300×300 мм
	Великі від 300×300 мм до 500×500 мм

Продовження таблиці 1

Ознака	Група
Форма	Прямокутна
	Кругла
	Нестандартна
Основний рух стола	Координатне переміщення (по осях *X* і *Y*)
	Поворотний рух (на певний кут, наприклад 240°)
	Обертальний рух (на 360°)
Принцип переміщення	Ручне керування
	Моторизоване управління (джойстиком, за допомогою комп'ютерної програми)
Кріплення об'єктів	Без кріплення
	Універсальні препаратотримачі
	Спеціалізований препаратотримач для поляризаційних мікроскопів
Ноніуси	Без ноніусів
	Механічні
	Електронні
	З фіксацією через певний проміжок
Матеріал	Металізована пластмаса
	Металевий
	Скло

За ознакою «основний рух стола», багатокоординатні робочі столики поділяються на 3 групи: координатні предметні столики, поворотні предметні столики і обертові предметні столики.

Координатні предметні столики для мікроскопів призначені для переміщення досліджуваного зразка по двох осях за допомогою здвоєної коаксіальної рукоятки (вручну) або електродвигуна (автоматично). Останні координатні столики називаються «скануючими», а управління ними здійснюється за допомогою контролера (джойстика) або спеціального програмного забезпечення [10]. Подібні аксесуари для приладів мікроскопії мають ноніус і координатну шкалу, завдяки яким можна відстежувати точність переміщення досліджуваного зразка в горизонтальній площині (рис. 2).



Рисунок 2 – Координатний предметний столик серії МСП-2

Поворотні предметні столики для мікроскопів забезпечують поворот координатного столу без координатного переміщення досліджуваного зразка. Як правило, кут повороту не перевищує 240 градусів. Використання поворотних столиків необхідно в трьох випадках [10].

1. При дослідженні зразка або роботі з системою аналізу зображення, коли необхідна установка мікрооб'єкта вивчення з невеликим нахилом.

2. При дослідженні мікрооб'єкта необхідно встановити, чи існує двопроменеве переломлення. Для цього поворотний предметний столик повертають на 90 градусів, і у випадку присутності в зразку мікрооб'єктів, що утворюють двопроменеве переломлення, при повороті столика, досліджуваний мікрооб'єкт буде темніти або світлішати.

3. Для якісної роботи з досліджуваним зразком необхідно ліво- і правостороннє розташування органів управління препаратоводієм [10].

На рисунку 3 показаний поворотний предметний столик серії МС100/300. Переваги цього столика полягають у вільній і швидкій установці досліджуваного препарату, а поворотний механізм дозволяє дуже плавно змінювати позицію мікрооб'єктів.



Рисунок 3 – Поворотний предметний столик серії МС100/300

Обертові предметні столики призначені для поляризаційних приладів для мікроскопії. Такий аксесуар забезпечений обертовим диском з поділками по колу, ціна однієї з яких дорівнює один градус. Відлік кутів повороту забезпечують закріплені на нерухомій частині столика два ноніуса. Фіксація диска, що обертається, здійснюється за допомогою стопорного гвинта. Також, на обертовому столику встановлений особливий препаратоводій для кріплення мікрооб'єкта дослідження, фіксація якого може здійснюватися як пружинними лапками, так і роздільними ручками управліннями [10].

Обертовий столик з великою платформою 7R170-190 (рис. 4) використовується для ручного обертання оптичних елементів безперервно на 360° з точністю 1° з подальшим точним настроюванням за допомогою мікрометра в межах 10° з точністю 0,5′. Платформа має набір кріпильних отворів М6 [9].



Рисунок 4 – Обертовий столик 7R170-190

Мікроманіпулятор – прилад, що дозволяє здійснювати тонкі і точні рухи мікроінструментів і виконувати в полі мікроскопа деякі операції на клітці (видалення і трансплантація ядер, ін'єкції різних речовин, відрізання ділянок цитоплазми тощо). Мікроманіпулятор складається з системи штативів, забезпечених гвинтами, які затискують мікроінструменти і забезпечують можливість руху останніх у всіх напрямках.

Існують різні моделі мікроманіпуляторів, які за рівнем переміщення поділяються на дві групи: модуль грубих переміщень і модуль точних переміщень.

Модуль грубих переміщень – переміщення здійснюються у відносно великих зонах (20-50 мм) на швидкостях до 10 мм/с при дозволі до 0,1 мм за рахунок ручного або електромеханічного приводів, до складу яких входять електродвигуни та механічні передачі (рейкові, гвинтові) [10].

Модуль точних переміщень – здійснює хід до 1-2 мм при максимальному дозволі 0,2 мкм за допомогою модулів, встановлених на приводах грубих переміщень, що включають електромеханічні приводи з черв'ячними, важільними і стрічковими передачами, або з мембранними об'ємними гідравлічними передачами. В основному ці мікроманіпуляційні системи мають по три ступені вільності на модулях грубого і точного переміщень [11].

За типами приводів моделі мікроманіпуляторів поділяються на механічні, гідравлічні,

пневматичні, п’єзоелектричні і моторизовані [11].

Механічний мікроманіпулятор забезпечує переміщення мікроінструмента по трьох осях з точністю 0,1-5 мкм. Подібний інструмент широко застосовується при мікроелектродних дослідженнях [11].

Принцип дії мікроманіпулятора досить простий: мікроподача інструменту здійснюється за рахунок переміщення платформ по осях за допомогою прецизійних гвинтів з високоточними різьбами. Іноді комбінують по два гвинта на кожну вісь: один для грубої подачі мікроінструменту, другий для точної.

На рисунку 5 показаний механічний маніпулятор MWS-1, який розроблений для використання в дослідницьких роботах під малим збільшенням на стереомікроскопі. Компактні розміри дозволяють розташувати прилад поблизу зразка. Маніпулятор має механізм повороту і повернення для полегшення зміни зразка або заміни піпетки [9].



Рисунок 5 – Механічний мікроманіпулятор MWS-1

Гідравлічний мікроманіпулятор забезпечує більш точне позиціонування, ніж просто механічні мікроманіпулятори. Даний вид мікроманіпуляторів дозволяє виконувати високоточні плавно редукційні переміщення мікроінструментів за трьома координатами. Також дає можливість дистанційного керування переміщеннями мікроінструментів. Гідравлічні мікроманіпулятори зазвичай складаються з основного блоку мікроманіпулятора і дистанційного блоку управління, сполученого з основним блоком трубками. Переміщення мікроінструментів здійснюється обертанням прецизійних гвинтів на блоці дистанційного управління, які передають зусилля на поршні з трубками заповненими маслом або водою. Рідина передає зусилля на мембрани на самому мікроманіпуляторі, які з’єднані з платформами переміщення мікроінструментів [11].

На рисунку 6 показаний гідравлічний мікроманіпулятор MMO-202ND, який призначений для плавного позиціонування і переміщення мікроінструменту по трьох осях. Всі органи управління виведені на джойстик. Так як джойстик підвішений, то управління відбувається комфортно розташованою на столі рукою оператора, який може виконувати роботу протягом тривалого часу [11].



Рисунок 6 – Гідравлічний мікроманіпулятор

Моторизований мікроманіпулятор відрізняється від механічних і гідравлічних маніпуляторів, тим що переміщення мікроінструменту проводиться за допомогою мікродвигунів, а не в ручну. Це дає можливість програмно контролювати переміщення мікроінструменту, що надає великі можливості для поліпшення характеристик мікроманіпулятора і зручності роботи з ним. Контроль за переміщенням мікроінструментів здійснюється джойстиком, зв'язаним через контролер управління з мікроманіпулятором. Моторизований мікроманіпулятор з програмним управлінням дає практично необмежені можливості контролю за переміщенням мікроінструментів: можна запам'ятовувати в пам'яті контролера положення піпетки, і після зміни мікроелектрода повертати його в робочу область одним натисканням кнопки. Це є дуже корисною функцією при проведенні патч-кламп експериментів, коли потрібно часто замінювати піпетки [11].

На рисунку 7 показаний моторизований мікроманіпулятор M-LSM, оснащений тримачами датчиків, які дозволяють швидко налаштувати розміри і кути нахилу датчиків. Лівий підналагоджувальний гвинт тримача дозволяє налаштувати розмір датчика (діаметром від 2 до 13 мм) і зафіксувати його позицію. Верхній підналаштовувальний гвинт дозволяє обертати тримач для настройки і фіксації кута нахилу датчика [11].

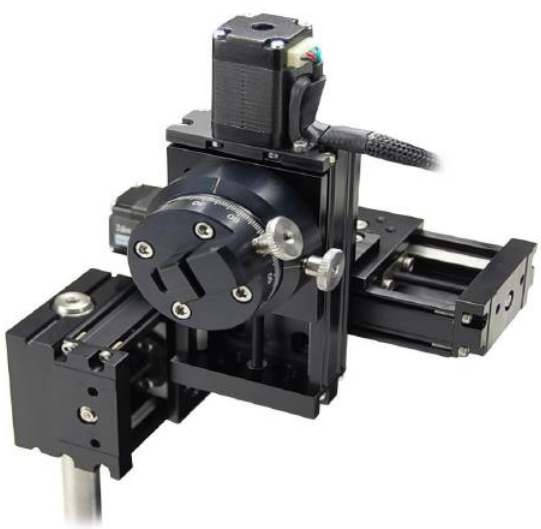


Рисунок 7 – Моторизований мікроманіпулятор

Пневматичні мікроманіпулятори (рис. 8) забезпечують [11].

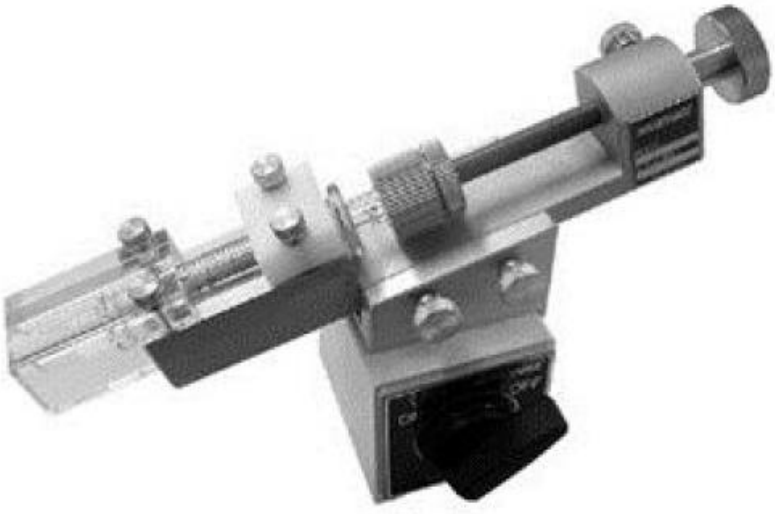


Рисунок 8 – Пневматичний мікроманіпулятор

1. Високоточні плавно редукційні переміщення мікроінструментів за трьома координатами від 0 до 1 мм.

2. Установчі переміщення за трьома координатами в межах 8-10 мм з точністю не менше 5 мкм за допомогою мікропозиціонера.

3. Дистанційне керування переміщеннями мікроінструментів.

Пневматичні мікроманіпулятори широко застосовуються при мікрохірургії клітини.

Виходячи з огляду інформаційних джерел, багатокоординатні системи точного позиціонування можна класифікувати за такими ознаками.

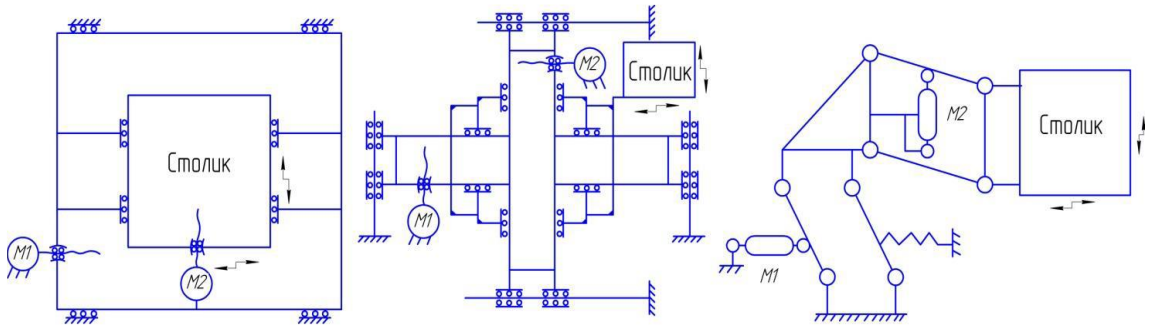
1. За кількістю ступенів рухливості: двокоординатні, трьохкоординатні, ..., шестикоординатні.
2. За типом руху: лінійний, поворотний, комбінований.
3. За діапазоном переміщень:

– від 0,01 нм до 100 нм;
– від 0,1 мкм до 10 мкм;
– від 10 мкм до 1 мм;
– від 1 мм до 100 мм.

4. За кінематикою: послідовна, паралельна кінематика, паралельно-послідовна.
5. За типом напрямних: ковзання, кочення, пружні напрямні.
6. За типом приводів: ручний з мікрометричними гвинтами, з двигунами постійного струму, двофазними кроковими двигунами, електромагнітними двигунами, п’єзоелектричними, магнітострикційними.
7. За кількістю рівнів точності: однорівневі і дворівневі.

Один з найбільш ефективних напрямків в розробці високоточних систем позиціонування – це створення дворівневих за рівнем точності пристроїв [12, 13]. Такий напрям перспективний для предметних столиків мікроскопів, що входять до складу автоматизованих комплексів дослідження мікрооб’єктів. Багатокоординатний предметний столик автоматизованого комплексу за цим принципом побудови може складатися з модуля грубих і великих переміщень, на який встановлюється модуль точних і малих переміщень.

На рисунку 9 представлені кінематичні схеми двокоординатних систем плоскопаралельного руху точного позиціонування.



а) б) в)

Рисунок 9 – Кінематичні схеми двокоординатних систем плоскопаралельного руху для точного позиціонування: а – послідовна з поступальними напрямними; б – паралельна з прогресивними напрямними; в – послідовна з шарнірами

Аналізуючи компонувальні схеми систем точного позиціонування, встановлено, що недоліком систем послідовної кінематики є великі габарити: на одній рухомій платформі знаходиться друга. Системи паралельної кінематики, в порівнянні з системами послідовної кінематики, мають велику жорсткість, менші габарити, не мають рухомих електричних кабелів, що зменшує опір руху і збільшує точність позиціонування. У системі паралельної кінематики центр ваги знаходиться нижче, що створює додаткову стійкість при позиціонуванні, і не накопичується сумарна похибка, пов’язана з похибкою позиціонування за кожною координатою, як у системі послідовної кінематики. Однак конструктивно системи з паралельною кінематикою складніші [14].

На рисунку 10 показаний автоматизований комплекс для дослідження мікрооб’єктів, який складається з основи 1, мікроскопа 2, відеокамери 3, мікроманіпулятора 4, автоматизованої багатокоординатної системи столика 5, джойстиків 6, монітора 7 і системи керування 8.

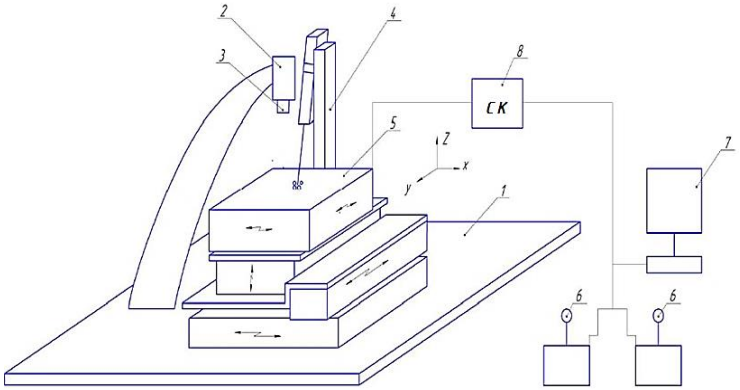


Рисунок 10 – Схема автоматизованого комплексу для дослідження мікрооб'єктів

Багатокоординатна система столика автоматизованого комплексу, що складається з модуля грубих переміщень і модуля точних переміщень (рис. 11).

а) б)

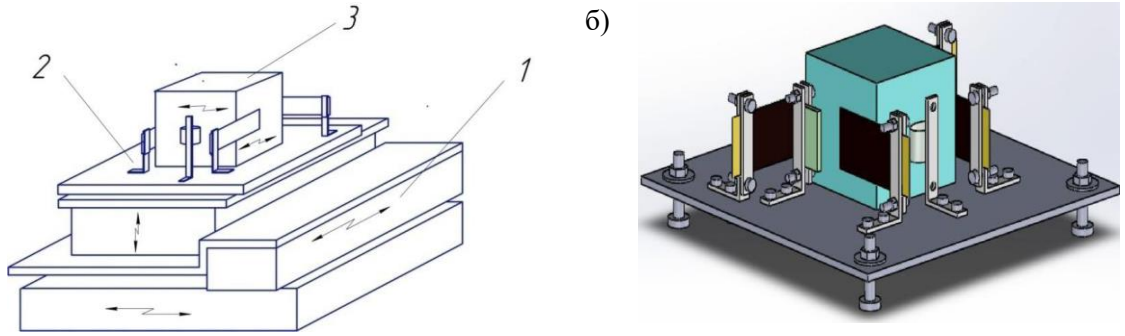


Рисунок 11 – Багатокоординатна система операційного столика комплексу для дослідження мікрооб'єктів (а) і 3D-модель модуля точних переміщень (б): 1 – модуль грубих переміщень, 2 – модуль точних переміщень, 3 – столик

Для здійснення грубих переміщень по осях *X*, *Y*, *Z* в діапазоні до 50 мм можна використовувати трьохкоординатний модуль 1 на базі крокових двигунів, а для точних переміщень на ньому встановлений модуль точних переміщень 2 предметного столика 3 на базі біморфних п'єзоактюаторів (БПА). Подібна автоматизована система має на порядок нижчу вартість в порівнянні з високоточними одномодульними системами позиціонування такого ж діапазону переміщень, оснащеними абсолютними енкодерами в якості датчиків переміщень [15, 16].

Робота автоматизованого комплексу з використанням модуля точних мікропереміщень столика полягає в наступному. На робочу поверхню столика поміщають біологічний матеріал для дослідження. Потім запускається відповідна програма, і сигнали з системи керування надходять на приводи крокових двигунів і маніпулятора. У певній послідовності відбувається рух модуля грубих переміщень по осях *X*, *Y* і *Z*. Через різницю розмірів і форми досліджуваних клітин, які дуже малі (близько 0,5×0,5 мкм), використовується система технічного зору, що визначає координати біологічної клітини по відношенню до мікроскопа. Столик переміщається в задані координати, і після цього відбувається дослідження клітини з допомогою мікроскопа і мікроманіпулятора. Можливе ручне керування столиком і мікроманіпулятором при допомогою джойстиків.

Висновки. Проведено аналіз сучасних багатокоординатних систем точного позиціонування, що застосовуються у мікроскопії, біомедичних технологіях, нанотехнологічному виробництві та приладобудуванні. Визначено основні конструктивні типи предметних столиків і мікроманіпуляторів, класифіковані за типом руху, принципом приводу, кінематичною структурою, рівнем точності та способом керування.

Обґрунтовано доцільність використання п'єзоелектричних виконавчих пристроїв у мікроманіпуляційних системах як найбільш ефективних для забезпечення високої точності, стабільності та швидкодії позиціонування. Розроблено структурну концепцію дворівневої системи точного позиціонування, що поєднує модулі грубих і точних переміщень для підвищення точності роботи у мікро- та наномасштабі.

Проведено порівняльний аналіз різних типів мікроманіпуляторів – механічних, гідравлічних, пневматичних, п'єзоелектричних і моторизованих. Встановлено, що п'єзоелектричні та моторизовані системи є найперспективнішими для створення високоточних автоматизованих комплексів завдяки їхній високій роздільній здатності, стабільності та можливості цифрового керування. Визначено переваги систем з паралельною кінематикою – вища жорсткість, менші габарити, підвищена стабільність і мінімізація сумарних похибок, що робить їх більш ефективними у задачах мікропозиціонування порівняно з системами послідовної кінематики.

Розроблено концепцію автоматизованого комплексу для дослідження мікрооб'єктів, який інтегрує багатокоординатний мікроманіпуляційний стіл з п'єзоелектричними приводами, систему технічного зору, мікроскоп і модуль комп'ютерного керування. Такий підхід забезпечує зростання точності, швидкодії та автономності проведення мікрооперацій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Зайцев Р. В., Кіріченко М. В., Зайцева Л. В. Методи дослідження структури тонких плівок: підручник. Харків: ФОП Бровін О. В., 2021. 320 с.

2. Теслюк В., Зелінський А., Каркульовський В. Розширене проєктування мікросистемних пристроїв: навч. посіб. URL: http://cad.lp.edu.ua/project/m6.pdf (дата звернення 07.10.2025).

3. Однодворець Л. В., Пазуха І. М., Лукавенко І. М. Оптоелектронні і лазерні системи в електроніці та медицині: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2022. 127 с.

4. Mohammad H. Abedin-Nasab. Handbook of robotic and imageguided surgery. URL: https://surl.li/fzmxim (дата звернення 08.10.2025).

5. Хорольський В. П., Коренець Ю. М. Мехатроніка (мехатроніка та інтелектуальна автоматика): навч. посіб. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2023. 342с.

6. Васильківський І. С., Федінець В. О., Юсик Я. П. Виконавчі пристрої систем автоматизації. URL: https://surl.li/tgqjor (дата звернення 08.10.2025).

7. Тимчик Г. С., Скицюк В І., Клочко Т. Р. Конструювання механотронних модулів. Точність механотронних модулів: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 79 с.

8. Теряєв В. І., Король С. В. Системи програмного та слідкуючого керування рухом: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 150 с.

9. Andrew J. Kurdila. Dynamics and control of robotic systems. URL: https://surl.li/vkiiii (дата звернення 08.10.2025).

10. «IKO International». URL: https://www.ikont.com/ (дата звернення 08.10.2025).

11. «Інфоком ЛТД». URL: https://surl.li/cqefqh (дата звернення 08.10.2025).

12. Омелян А. В. Методи та система підвищеної ефективності керування п'єзоелектричним мікроманіпулятором: дис. … д-ра філософії: 172. Київ, 2022. 160 с.

13. Денисюк В. Ю., Кравчук О. О. Система керування точністю мікропереміщень предметного столика мікроскопа. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2025: матер. XI Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 07 трав. 2025 р.). Київ: «Політехніка», 2025. С. 16-17.

14. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Шибковський І. А. Метрологічне забезпечення вимірювання механічних та трибологічних властивостей матеріалів на субмікронному і нанометровому діапазонах лінійних розмірів. «*Перспективні технології та прилади*»: зб. статей. Луцьк: ЛНТУ, 2020. Вип. 17. С. 33-41.

15. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Тимощук А. А., Черняк С. О. Аналіз систем мікропереміщень для маніпулювання мініатюрними об'єктами. *«Теоретичні і експериментальні дослідження в сучасних технологіях матеріалознавства та машинобудування»*: зб. матер. VIII Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Луцьк, 25-28 трав. 2021 р.) Луцьк: ЛНТУ, 2021. С. 25-27.

16. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С. Дослідження точності мікропереміщень предметного столика мікроскопа з біморфними п'єзоактюаторами. *Технічна творчість*: зб. наук. праць. Хмельницький: ХНУ, 2021. № 4. С. 10-11.

УДК 621.7.01
Денисюк В. Ю., Остаповець А. О.
Луцький національний технічний університет
E-mail: v.denysiuk@lntu.edu.ua

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВИРОБІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ МЕТОДАМИ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА

У статті розглянуто напрями удосконалення систем контролю якості виробів, виготовлених методами адитивного виробництва. Проведено детальний аналіз сучасних методів неруйнівного контролю, зокрема візуально-оптичного, термографічного, рентгенівського, акустичного та електромагнітного. Встановлено, що більшість традиційних методик орієнтовані на контроль готових виробів і не забезпечують своєчасного виявлення дефектів, які виникають у процесі формування матеріалу. Обґрунтовано доцільність застосування акустико-емісійного методу для моніторингу процесів дефектоутворення під час селективного лазерного плавлення. Показано, що реєстрація акустико-емісійних сигналів у реальному часі дає можливість оцінювати стан матеріалу та прогнозувати появу структурних порушень. Отримані результати можуть стати основою для створення інтегрованих інформаційно-вимірювальних систем контролю якості, здатних забезпечити підвищення надійності, точності та ефективності процесів адитивного виробництва.

Ключові слова: адитивне виробництво, неруйнівний контроль, акустична емісія, селективне лазерне плавлення, дефектоутворення, контроль якості.

Denysiuk V., Ostapovets A. Improvement of quality control systems for products manufactured by additive manufacturing methods. The article considers the directions of improving the quality control systems of products manufactured by additive manufacturing methods. A detailed analysis of modern non-destructive testing methods, in particular visual-optical, thermographic, X-ray, acoustic and electromagnetic, is carried out. It is established that most traditional methods are focused on the control of finished products and do not provide timely detection of defects that arise in the process of forming the material. The feasibility of using the acoustic emission method for monitoring the processes of defect formation during selective laser melting is substantiated. It is shown that the registration of acoustic emission signals in real time makes it possible to assess the state of the material and predict the appearance of structural defects. The results obtained can become the basis for the creation of integrated information and measuring quality control systems capable of ensuring increased reliability, accuracy and efficiency of additive manufacturing processes.

Keywords: additive manufacturing, non-destructive testing, acoustic emission, selective laser melting, defect formation, quality control.

Постановка проблеми. Швидкий розвиток технологій адитивного виробництва, зокрема 3D-друку, відкриває широкі можливості для виготовлення складних за геометрією деталей у різних галузях – від авіакосмічної до медичної. Проте разом із перевагами, такими як зниження матеріаломісткості, можливість персоналізації та скорочення виробничого циклу, виникає низка проблем, пов'язаних із забезпеченням стабільної якості готових виробів.

Адитивні процеси характеризуються складними фізико-хімічними явищами під час формування шарів матеріалу, що призводить до появи дефектів різного походження – пористості, внутрішніх напружень, деформацій, відхилень геометричних розмірів та неоднорідності структури. Традиційні методи неруйнівного контролю не завжди забезпечують необхідну точність і швидкість оцінки якості виробів, створених адитивними технологіями, особливо при використанні нових матеріалів і комбінованих технологічних процесів [1, 2].

У зв'язку з цим виникає потреба в аналізі існуючих методів контролю якості виробів, визначенні їхніх переваг, обмежень і сфер ефективного застосування з метою формування підґрунтя для розробки інтегрованих систем моніторингу та автоматизованої оцінки якості в адитивному виробництві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях з адитивного виробництва значна увага приділяється вивченню структурних особливостей матеріалів, сформованих методом селективного лазерного плавлення (СЛП), та впливу технологічних параметрів процесу на якість кінцевих виробів. Як відзначають автори низки робіт [3-7], специфіка СЛП полягає у високій локалізації теплової енергії та швидкому чергуванні процесів плавлення і

твердіння, що зумовлює виникнення широкого спектра дефектів у матеріалі. Найпоширенішими з них є пористість, неповне плавлення порошку та тріщиноутворення.

Пористість у спеченому матеріалі формується внаслідок недосконалого спікання частинок порошку, що призводить до появи газових пор, пустот або нерозплавлених зон. Дослідження [5-7] показують, що структура матеріалу визначається не лише об'ємом пор, але й їх формою, розміром, просторовим розподілом та якістю міжчасткових контактів. Ці чинники істотно впливають на механічні властивості виробів – міцність, пластичність, в'язкість і довговічність. Навіть поодинока пора, особливо клиноподібної форми, може спричинити концентрацію напружень і передчасне руйнування деталі.

Згідно з дослідженнями [8-10], одним із визначальних параметрів процесу СЛП є густина упаковки порошкових частинок. Низька густина сприяє накопиченню газів у розплаві, що під час швидкого охолодження утворюють замкнені газові бульбашки. Іншим джерелом дефектів є нестача енергії лазерного випромінювання, що призводить до неповного плавлення порошку й утворення порожнин, заповнених нерозплавленими частинками. У таких випадках порожнини часто супроводжуються втратою міжшарової адгезії, що знижує структурну цілісність виробу.

Автори праць [11-13] підкреслюють, що параметри процесу – швидкість сканування, потужність лазера, товщина шару, крок друку, а також склад і фракція порошку – безпосередньо визначають умови теплового поля та швидкість кристалізації. Неправильний вибір цих параметрів викликає не лише пористість, а й шорсткість поверхні, що погіршує текучість розплавленого металу, сприяючи подальшому утворенню міжшарових дефектів. Накопичення таких дефектів у кількох шарах призводить до формування великих пустот і зниження механічної надійності виробу.

Особливої уваги заслуговують роботи [14, 15], у яких досліджено механізми утворення тріщин під час СЛП. Високі температурні градієнти, залишкові напруження та нерівномірне охолодження зумовлюють зародження мікротріщин, які з часом можуть об'єднуватися в макродефекти. Для нержавіючих сталей і суперсплавів на основі нікелю, що характеризуються низькою теплопровідністю й високим коефіцієнтом теплового розширення, ризик тріщиноутворення особливо високий.

У цілому аналіз літературних джерел показує, що якість виробів, виготовлених методом селективного лазерного плавлення, істотно залежить від комплексу технологічних параметрів та їх взаємодії. Тому актуальним напрямом сучасних досліджень є розробка інформаційно-вимірювальних систем і методів неруйнівного контролю, здатних виявляти пори, порожнини та тріщини на ранніх стадіях їх формування безпосередньо в процесі друку. Це дозволить забезпечити стабільну якість, відтворюваність і надійність продукції адитивного виробництва.

Мета роботи – аналіз сучасних методів контролю якості виробів, отриманих технологіями адитивного виробництва, визначення їх переваг і обмежень, а також обґрунтування доцільності використання акустико-емісійного методу як перспективного підходу до оперативного неруйнівного контролю процесу формування виробів методом селективного лазерного плавлення.

Викладення основного матеріалу. Для забезпечення необхідних властивостей та характеристик виробів, виготовлених із застосуванням адитивних технологій, важливо здійснювати контроль не лише технологічних параметрів процесу плавлення (потужності лазера, температури плавлення, швидкості та кроку сканування), а й проводити неруйнівний контроль самого виробу, що формується [16].

Руйнівні методи контролю забезпечують високу точність визначення внутрішніх напружень у готових виробах. Водночас неруйнівні методи дають змогу оцінювати абсолютні значення залишкових напружень із відомими похибками вимірювання. Однак основним недоліком руйнівного контролю є часткове або повне порушення цілісності об'єкта дослідження (зокрема, шляхом свердління отворів, вирізання зразків чи нанесення міток). Такі дії призводять до внесення конструктивних змін або навіть до руйнування виробу, що унеможливлює його подальше використання. Тому руйнівні методи найчастіше застосовують лише для непрямих досліджень – під час виготовлення та випробування зразків-свідків. Крім того, такі методи не придатні для контролю під час самого процесу адитивного формування.

Натомість застосування методів неруйнівного контролю забезпечує можливість виявлення дефектів, відстеження процесу їх зародження та розвитку, а також визначення фізико-механічних властивостей матеріалу як у готовому виробі, так і безпосередньо під час його виготовлення.

Групою дослідників [17] було виконано аналіз ефективності різних методів неруйнівного контролю в умовах адитивного виробництва, що дозволив зробити висновок про їх перспективність для забезпечення високої якості готових виробів (табл. 1).

Таблиця 1 – Можливість застосування різних методів неруйнівного контролю на дослідження виробів, отриманих методами адитивного виробництва [17]

Метод контролю	Мікроструктура	Тріщини, пористість, пустоті	Механічні властивості	Точність геометричних розмірів	Шорсткість	Залишкове напруження
Візуальний	–	пов.	–	пов.	пов.	–
Ультразвуковий	+	+	+	+	+	+
Вихрострумовий	+	пов.	–	–	–	–
Радіографічний	+	+	–	+	+	–
Магнітний	+	пов.	–	–	–	+
Капілярний	–	пов.	–	–	+	–
Ширографія	–	+	–	–	–	+
Термографія	–	пов.	–	–	–	–

Примітка: пов. – контроль параметрів поверхневого шару

Візуально-оптичний метод ґрунтується на виявленні поверхневих дефектів контрольованого виробу і належить до найпоширеніших методів неруйнівного контролю. Для підвищення точності огляду використовуються оптичні засоби, такі як лупи, мікроскопи, відеокамери та інші прилади, що забезпечують збільшення та документування зображення поверхні.

Інфрачервона термографія, як один із методів неруйнівного контролю (НК), базується на аналізі температурного поля поверхні досліджуваного об’єкта. Її принцип дії пов’язаний із відмінністю теплопровідності між основним матеріалом та його дефектними ділянками. Неоднорідності у структурі змінюють напрямок і швидкість теплового потоку, внаслідок чого на поверхні виникають температурні градієнти, що фіксуються інфрачервоною камерою у вигляді теплових контрастів.

Розрізняють два основних підходи термографії – пасивний і активний. У пасивному режимі вимірюється природний розподіл температури на поверхні контрольованого зразка, тоді як активна термографія передбачає зовнішнє нагрівання або охолодження об’єкта з подальшим вимірюванням утвореного температурного поля. Під час активного методу поверхня зразка нагрівається (наприклад, за допомогою лазера чи імпульсної лампи), а поширення теплових хвиль крізь матеріал дозволяє виявляти внутрішні дефекти за рахунок локальних відхилень температури.

Для виробів, виготовлених адитивними технологіями, термографічний контроль вважається менш чутливим до впливу шорсткості поверхні порівняно з іншими методами НК. Тип джерела теплового збудження обирається залежно від характеру дефектів. Зокрема, застосування лазерного або імпульсного нагріву дозволяє виявляти поверхневі тріщини шириною менше 1 мм при відповідному співвідношенні сторін [18].

Рентгенівська комп’ютерна томографія (КТ) є високоефективним методом неруйнівного контролю, що забезпечує візуалізацію внутрішньої структури об’єкта з роздільною здатністю до сотень нанометрів. Принцип методу базується на ослабленні іонізуючого випромінювання при проходженні крізь матеріал, ступінь якого визначається товщиною, густиною об’єкта та енергією випромінювання. На основі серії тіньових проекцій за допомогою алгоритмів фільтрованої зворотної проекції виконується пошарова реконструкція рентгенівської густини матеріалу. Серед основних переваг методу КТ – повна неруйнівність, висока просторово-структурна роздільна здатність та можливість дослідження матеріалів із широким діапазоном густин, у тому числі композитних структур типу «вуглець-вуглець».

Акустичні методи неруйнівного контролю ґрунтуються на явищі акустопружності, що полягає у зміні параметрів поширення пружних хвиль у матеріалі під дією внутрішніх або зовнішніх напружень. Такі методи широко застосовуються для дослідження фізико-механічних властивостей твердих тіл, контролю структурного стану та виявлення дефектів у конструкційних матеріалах.

Серед акустичних методів особливе місце посідає ультразвуковий контроль, який є одним із найефективніших та універсальних способів діагностики. Його можна застосовувати для аналізу виробів, виготовлених із різних матеріалів – як металевих, так і неметалевих, включно з пластиками

та композитами. Перевагою ультразвукових методів є можливість визначення пружних, міцнісних і структурних характеристик матеріалу, зокрема модуля пружності, твердості та межі міцності.

Основою ультразвукового контролю є вимірювання швидкості поширення та коефіцієнта загасання ультразвукових хвиль у матеріалі. Ці параметри залежать від складу, структури та орієнтації зерен матеріалу. Вимірюючи швидкість поздовжніх і поперечних хвиль у полікристалічних матеріалах, можна визначати модуль пружності, тоді як у монокристалічних – константи пружної анізотропії. Коефіцієнт загасання хвиль несе інформацію про внутрішню структуру матеріалу, зокрема про наявність неоднорідностей, пор, тріщин, розмір і тип дефектів.

Серед недоліків методу варто відзначити високі вимоги до стану поверхні контрольованого об’єкта (зокрема шорсткості), а також необхідність використання контактної рідини для забезпечення акустичного з’єднання між перетворювачем і поверхнею. Цих обмежень можна уникнути завдяки застосуванню безконтактних електроакустичних перетворювачів, які активно впроваджуються останнім часом. Їх використання дозволяє підвищити точність і достовірність визначення внутрішніх напружень у готових виробах, особливо під час контролю поперечними хвилями.

Основним фізичним явищем, на якому ґрунтуються електромагнітні методи контролю напружено-деформованого стану матеріалів, є магнітопружний ефект. Він полягає у зміні магнітних властивостей матеріалу під дією механічних напружень. Під час реалізації таких методів досліджуються характеристики, пов’язані з магнітострикцією, залишковою намагніченістю, коерцитивною силою, магнітною проникністю та іншими параметрами, що відображають стан матеріалу.

Попри високу інформативність, електромагнітні методи мають низку обмежень. Зокрема, більшість існуючих підходів до контролю застосовуються лише на завершальних етапах виготовлення виробів адитивного виробництва, що не дозволяє своєчасно виявляти дефекти, які виникають під час формування шару. Крім того, кожен метод характеризується власною контроледоступністю, тобто здатністю до виявлення дефектів певного типу або розміру.

У виробах, виготовлених методом селективного лазерного плавлення, часто виникають специфічні дефекти – порожнини, заповнені несплавленим порошком, які важко виявити традиційними електромагнітними та акустичними методами.

З метою підвищення ефективності неруйнівного контролю запропоновано застосування методу акустичної емісії, який дозволяє розширити діагностичні можливості існуючих систем контролю, забезпечуючи виявлення активних дефектів у реальному часі.

Акустико-емісійний процес представлено на рисунку 1. Акустична емісія (АЕ) – це процес виникнення пружних хвиль напруження, які утворюються в матеріалі внаслідок раптового локального вивільнення енергії під час пластичної деформації, зародження, розповсюдження або злиття тріщин, а також при фазових і структурних перетвореннях [19, 20].

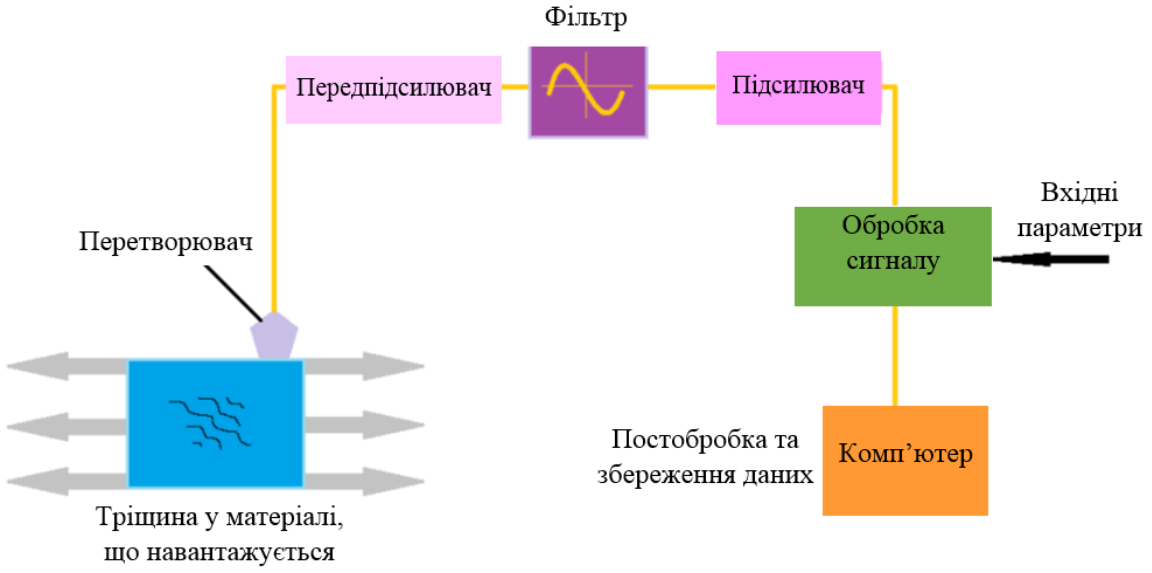


Рисунок 1 – Схема вимірювання параметрів акустичної емісії

Джерелом акустичної емісії є локальна ділянка об'єкта контролю, у якій відбувається перетворення потенціальної чи іншої енергії в механічну енергію пружних хвиль. Випромінювані хвилі поширюються крізь матеріал і фіксуються спеціальними перетворювачами, що дозволяє ідентифікувати місце та характер дефекту.

Акустико-емісійний метод контролю відрізняється інтегральним характером дії, високою чутливістю до локальних змін у структурі матеріалу та здатністю виявляти навіть зародкові стадії розвитку дефектів малого розміру в режимі реального часу.

Метод акустичної емісії належить до високочутливих методів неруйнівного контролю, який полягає у виявленні, реєстрації та аналізі пружних коливань, що виникають у матеріалі під час розвитку дефектів. Його принципова перевага полягає у здатності фіксувати не лише вже існуючі пошкодження, але й зародження та початкові етапи розвитку потенційно небезпечних дефектів, що вигідно відрізняє його від традиційних ультразвукових методів контролю [21].

Під час виникнення або росту неоднорідності у матеріалі контрольованого об'єкта відбувається вивільнення енергії, яке проявляється у вигляді короткочасних акустичних імпульсів. Ці імпульси у вигляді пружних хвиль різних типів поширюються в об'ємі матеріалу та реєструються перетворювачами акустичної емісії (ПАЕ). Отриманий електричний сигнал формується внаслідок перетворення механічних коливань у п'єзоелектричному елементі приладу АЕ.

Процес контролю включає кілька основних етапів.

1. Генерація сигналів АЕ – локальні зміни мікроструктури матеріалу (тріщиноутворення, пластична деформація, фазові переходи тощо) викликають короткі імпульси пружної енергії.

2. Реєстрація сигналів – пружні хвилі фіксуються датчиками АЕ, які перетворюють їх у електричні імпульси.

3. Підсилення та фільтрація – сигнал проходить через попередній підсилювач та фільтри, що відокремлюють корисні сигнали від фонових шумів.

4. Аналіз параметрів – амплітуда, тривалість, частота, активність, імпульсні характеристики та форма сигналу використовуються для ідентифікації джерела акустичної емісії.

5. Локалізація дефекту – за допомогою кількох сенсорів визначається положення джерела АЕ та оцінюється рівень загрози дефекту.

До ключових переваг методу акустичної емісії належать:

– можливість виявлення активних дефектів незалежно від їх розміру;

– висока чутливість до процесів, що розвиваються в матеріалі;

– здатність до контролю об'єктів складної форми завдяки інтегральності методу;

– мінімальна залежність від структури й властивостей матеріалу;

– можливість безперервного моніторингу технічного стану в реальному часі.

Виявлення акустичної емісії базується на її фізичній суті – пружному вивільненні енергії, спричиненому незворотними змінами мікроструктури. У зоні джерела АЕ ця енергія генерує імпульс напруження, який поширюється матеріалом у вигляді перехідних пружних хвиль. Залежно від геометрії зразка та властивостей матеріалу, сигнал може мати різну форму й частотний склад.

П'єзоелектричні перетворювачі, встановлені на поверхні об'єкта безпосередньо або через хвилевід, сприймають компоненту коливань, перпендикулярну до поверхні. Отриманий сигнал попередньо підсилюється, подається до вимірювальної системи, де проходить повторне підсилення та цифрову обробку.

Оскільки вимірювання АЕ часто проводяться в умовах наявності фонового шуму, встановлюється граничний рівень спрацьовування системи, який забезпечує фільтрацію завад. Для переривчастих сигналів кожен імпульс оцінюється окремо, а початок події АЕ визначається моментом, коли амплітуда сигналу вперше перевищує встановлений поріг (рис. 2).

Детальне застосування методу акустичної емісії при дослідженні матеріалів, виготовлених адитивними технологіями, дозволяє не лише виявляти дефекти, але й ідентифікувати механізми їх утворення, локалізувати потенційно небезпечні зони та оптимізувати режими вирощування виробів для підвищення якості та надійності готової продукції.

Кінець процедури АЕ визначається з використанням мертвого часу t_d (у приладах Physical Acoustic Corporation цей параметр позначається як HDT – Hit Definition Time). Момент завершення t_e процедури АЕ фіксується тоді, коли амплітуда сигналу не перевищує встановлений граничний рівень упродовж останнього періоду t_d. Таким чином, тривалість процедури визначається як різниця між моментами її завершення та початку $t_e - t_s$.

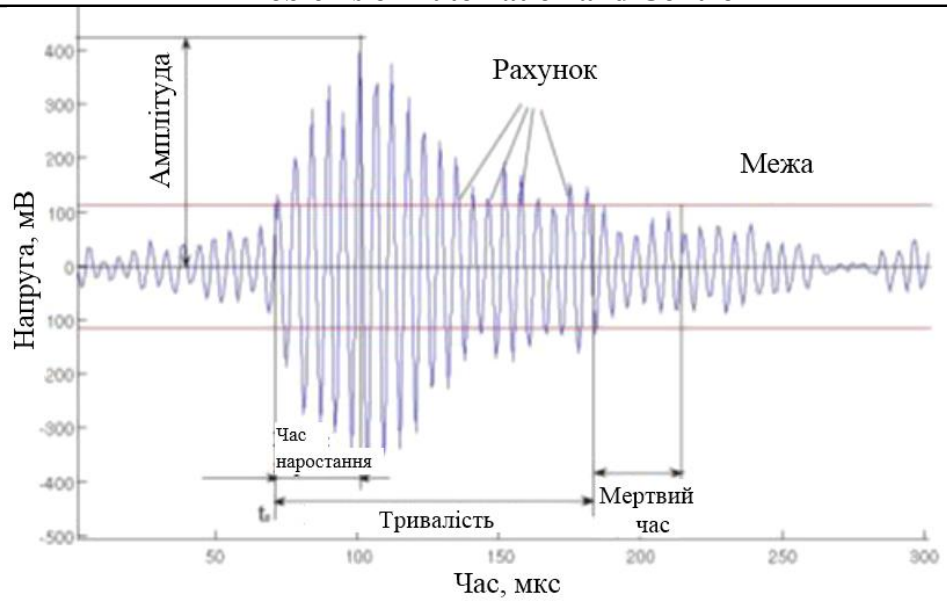


Рисунок 2 – Визначення параметрів дискретного сигналу

На рисунку 2 подано основні параметри дискретного сигналу акустичної емісії, які використовуються для аналізу процесів дефектоутворення:

– амплітуда – максимальне значення сигналу АЕ протягом усього часу його тривалості;

– час наростання – проміжок часу від початку процедури АЕ до моменту досягнення максимальної амплітуди;

– рахунок – кількість зареєстрованих перевищень сигналом встановленого порогу спрацьовування;

– тривалість – проміжок часу між початком і завершенням імпульсу АЕ;

– енергія процедури – площа під кривою сигналу акустичної емісії, що характеризує кількість вивільненої пружної енергії.

Форму типової хвилі сигналу акустичної емісії представлено на рисунку 3.

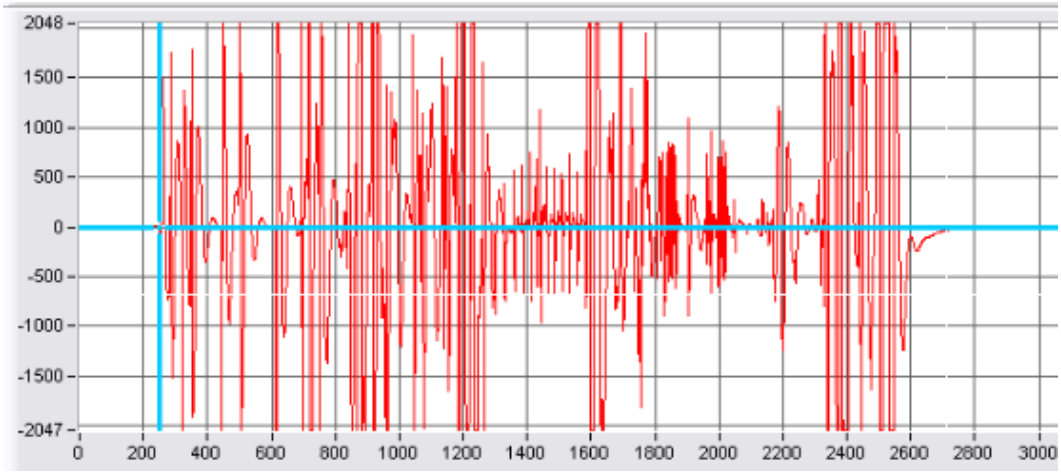


Рисунок 3 – Форма сигналу акустичної емісії

Аналіз форми сигналів АЕ дає змогу доповнити інформацію про характер джерел АЕ-сигналів та підвищити достовірність результатів контролю. Зокрема, це дозволяє ідентифікувати та виключати з подальшої обробки сигнали, пов’язані з фоновими шумами технологічного обладнання або ефектами тертя між гранулами порошку.

Для практичної реалізації акустико-емісійного контролю у процесі вирощування виробів методом селективного лазерного плавлення виникає потреба у модифікації існуючих моделей формування та розвитку джерел АЕ з урахуванням фазових переходів і потенційних зон зародження дефектів [22, 23].

Крім того, актуальним є завдання встановлення кореляційних залежностей між параметрами акустичної емісії та фізико-хімічними процесами, що відбуваються в матеріалі під час адитивного формування. Це забезпечить можливість раннього виявлення дефектоутворення, підвищення точності діагностики якості структури виробів і створення адаптивних систем моніторингу процесу селективного лазерного плавлення у реальному часі.

Висновки. Проведений аналіз існуючих методів контролю якості показав, що традиційні методи неруйнівного контролю (візуально-оптичний, інфрачервона термографія, рентгенівська комп'ютерна томографія, ультразвуковий та електромагнітний методи) забезпечують високу точність виявлення дефектів, проте переважно застосовуються лише на фінальному етапі виробництва. Вироби, виготовлені методами селективного лазерного плавлення, характеризуються наявністю внутрішніх дефектів (пористість, мікротріщини, залишкові напруження), що часто залишаються невиявленими традиційними методами контролю. Це потребує впровадження нових підходів до моніторингу якості під час процесу вирощування.

Акустико-емісійний метод неруйнівного контролю виявився одним із найбільш перспективних, оскільки дозволяє реєструвати динамічні процеси дефектоутворення, ідентифікувати стадії зародження тріщин та локалізувати джерела пошкоджень у режимі реального часу.

Розвиток напрямку акустико-емісійного контролю для адитивних технологій потребує подальших досліджень, спрямованих на створення моделей формування сигналів АЕ залежно від фазових переходів, розроблення алгоритмів обробки та фільтрації сигналів, а також побудову інформаційно-вимірювальних систем адаптивного моніторингу процесу селективного лазерного плавлення.

Використання таких систем у виробництві сприятиме підвищенню якості, точності та надійності виробів, виготовлених технологіями адитивного виробництва, що є важливим етапом у розвитку інтелектуальних технологій контролю якості.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Пупань Л. І. Постпроцеси адитивних технологій: навч. посіб. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. 91 с.

2. Манжілевський О. Д., Іскович-Лотоцький Р. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2021. 105 с.

3. Овчинников О. В., Дурягіна З. А., Романова Т. Є. Порошкові титанові сплави для адитивних технологій: структура, властивості, моделювання: монографія. Київ: Наукова думка, 2021. 196 с.

4. Сусліков Л. М., Дьордяй В. С. Фізика і технологія наноматеріалів: навч. посіб. Ужгород: «Говерла», 2023. 437 с.

5. Ганєєв Т. Р., Прибитько І. О., Руденко М. М., Петренко І. О. Адитивні технології: навч. посіб. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2023. 105 с.

6. Діденко Ю. В., Татарчук Д. Д. Основи технології виготовлення елементів мікро- та наносистемної техніки: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка», 2022. 113 с.

7. Денисюк В.Ю. Аналіз сучасних технологій контролю виробів адитивного виробництва. «Перспективні технології та прилади»: зб. статей. Луцьк, 2025. Вип. 26. С. 57-65.

8. Wang L., Qiao P., Liang J., Chen T., Wang X., Yang G. Accurate channel estimation and adaptive underwater acoustic communications based on Gaussian likelihood and constellation aggregation. *Sensors*. 2022. № 22 (6). P. 2142.

9. Nemade C., Pujeri U. ECFL-IoVT: emergency communications using fuzzy logic for internet of vehicle things. *Engineered Science*. 2023. № 28(2). P. 1056.

10. Полупан А. С., Сікульський В. Т. Теоретичне визначення режимів селективного лазерного плавлення для виготовлення деталей з мінімальним рівнем пористості. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*: наук.-техн. журн. Харків, 2022. № 2(178). С. 38-46.

11. Програмне забезпечення для моделювання 3D-друку металу Ansys Additive Manufacturing Solutions. URL: https://www.ansys.com/products/additive (дата звернення: 10.10.2025).

12. Francis Z. R., Teng C., Ginn J. S., Dong H., Jacquemetton L., Betts S., Beckett D., Heigel J. Combination of Modeling and Thermal Sensing to Understand Additive Manufacturing Processes. URL: https://surl.lu/cnppuw (дата звернення: 10.10.2025).

13. Вибіркове лазерне плавлення. Служба 3D-друку FacFox URL: https://surl.li/qhbeyf (дата звернення: 11.10.2025).

14. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В.,Бадюк С. І. Дослідження ефективність електрохімічного полірування зразків змінного перерізу з різною шорсткістю зі сталі AISI 316L, виготовлених за технологією SLM. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*: наук.-техн. журн. Харків, 2021. № 2(170). С. 66-73.

15. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Досвід застосування регулювання діаметра фокусної плями променю лазера для підвищення продуктивності СЛП-процесу. *Автоматичне зварювання*: міжнар. наук.-техн. та виробн. журн. Київ, 2021. № 5. С. 21-27.

16. Матвійчук В. А. Адитивні електронно-променеві технології виготовлення металевих виробів методом пошарового наплавлення із застосуванням порошкових матеріалів: дис… канд. техн. наук: 05.03.06. Київ, 2025. 214 с.

17. Матвійчук В. А., Нестеренков В. М., Берднікова О. М. Адитивна електронно-променева технологія виготовлення металевих виробів із порошкових матеріалів. *Автоматичне зварювання*: міжнар. наук.-техн. та виробн. журн. Київ, 2022. № 2. С. 16-25.

18. Radhika C., Ragavanantham Shanmugam, Monsuru Ramoni, Gnanavel B. A review on additive manufacturing for aerospace application. *Mater. Res. Express* 11 022001 (2024). URL: https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad21ad (дата звернення: 11.10.2025).

19. Неклюдов І. М., Назарчук З. Т., Скальський В. Р., Добровольська Л. Н. Застосування методу акустичної емісії для діагностування корпусів ядерних реакторів (огляд). URL: https://surli.cc/etospm (дата звернення: 11.10.2025).

20. Микитин Г. В., Сікора Л. С. Концептуальні засади створення методологічних підходів для розроблення інформаційних технологій відбору даних від металоконструкцій за сигналами акустичної емісії, магнітної післядії, деформації. URL: https://surl.li/lcxxzn (дата звернення: 11.10.2025).

21. Павлій О. В., Крюкова О. А. Методи неруйнівного контролю та можливості їх використання для контролю якості продукції адитивних технологій. URL: https://surl.li/zqsyus (дата звернення: 11.10.2025).

22. Quintana M. J., Ji Y., Collins P. C. A perspective of the needs and opportunities for coupling materials science and nondestructive evaluation for metals-based additive manufacturing. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*. 2023. № 3. P. 31-45.

23. Селективне лазерне спікання (SLS). URL: https://surl.li/lejakf (дата звернення: 11.10.2025).

УДК 661.65:661.55

Дикса В. В., Лапченко Ю. С.
Луцький національний технічний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЧАСОВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ ТА ЇЇ КАЛІБРУВАННЯ

У статті описано модернізований прилад для динамічних вимірювань твердості в мікро- та нанометровому масштабі. Його функціональні можливості та межі вимірювання були суттєво розширені відповідно до цілей та завдань дослідження. Виконано оцінку відносної похибки обчислення твердості в залежності від похибки вимірювання глибини відбитка, відбитку при першому торканні, пружного прогину вимірювальної системи, гостроти кінчика індентора, форми друку, теплового дрейфу, шорсткості поверхні зразка.

Ключові слова: індентор, наноіндентерування, похибка, наноіндентометр, підатливість.

Dyksa V., Lapchenko Y. Experimental setup for measuring time dependences of material characteristics and its calibration. The article describes a modernized device for dynamic hardness measurements on the micro- and nanometer scale. Its functional capabilities and measurement limits have been significantly expanded in accordance with the goals and objectives of the study. The relative error of hardness calculation was estimated depending on the measurement error of the indentation depth, the indentation at the first touch, the elastic deflection of the measuring system, the sharpness of the indenter tip, the print shape, thermal drift, and the roughness of the sample surface.

Keywords: indenter, nanoindentation, error, nanoindentometer, compliance.

Постановка проблеми. Похибки неминучі за будь-яких вимірювань, який би точний прилад для цих цілей не використовувався. Вони можуть бути випадковими та систематичними, і їх джерелом є не лише вимірювальна техніка, а й методика розрахунків і сам зразок. Наноіндентерування в цьому плані не є винятком. Крім тривіальних джерел похибки, що визначаються якістю вимірювальних датчиків, тут неминуче є багато інших, на перший погляд непомітних, джерел похибок.

Метою роботи є аналіз можливих видів похибок та їх джерел, які можуть виникати при наноіндентеруванні матеріалів.

Викладення основного матеріалу.

Для реалізації таких методик як індентерування одноразовим прямокутним імпульсом сили, індентерування трапецеїдальним імпульсом сили та індентерування східчасто зростаючим імпульсом сили, використовувався модернізований прилад для динамічних вимірювань твердості в мікро- та нанометровому масштабі [1]. Його функціональні можливості та межі вимірювання були суттєво розширені відповідно до цілей та завдань дослідження. Так просторову роздільну здатність розширено та доведено до 1 нм, тимчасову – до 50 мкс. Схема експериментальної установки наведена на рисунку 1.

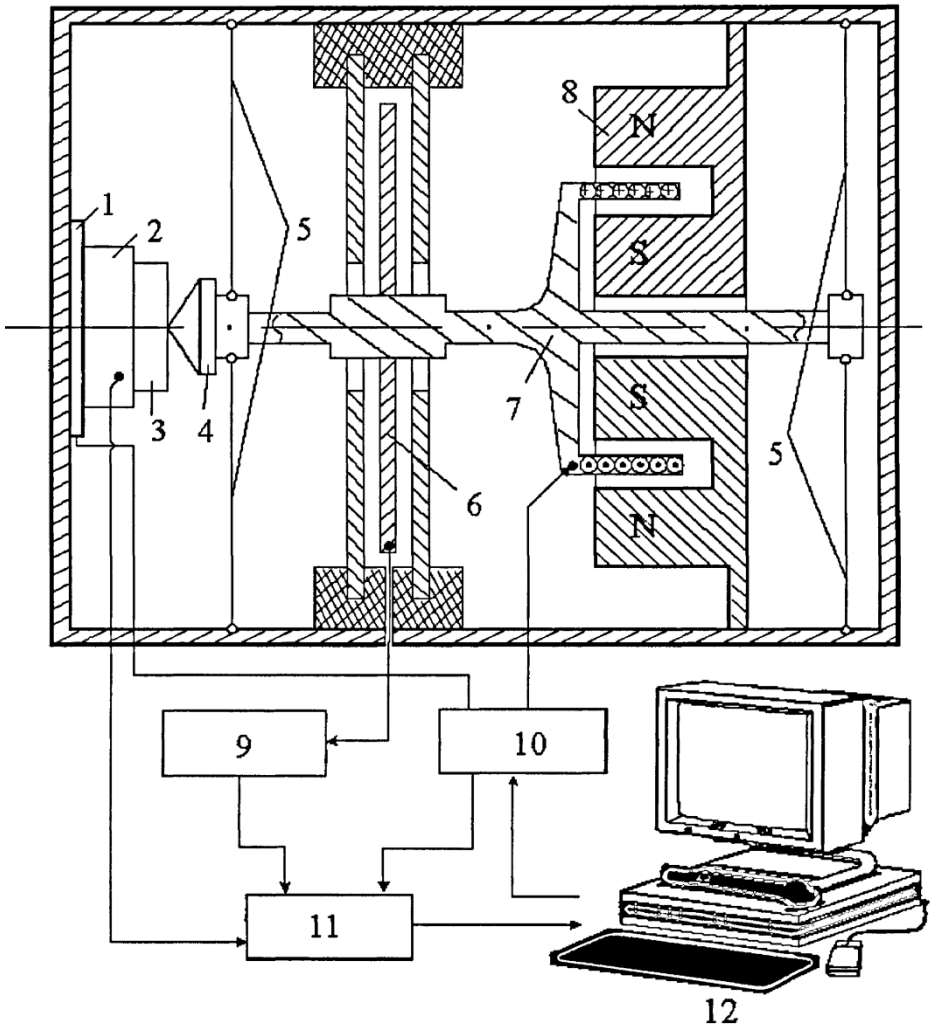


Рисунок 1 – Блок–схема експериментальної установки для динамічного наноіндентерування. 1 – столик з 3–х координатним п’єзокерамічним приводом, 2 – датчик навантаження, 3 – зразок, 4 – індентор, 5 – елементи підвісу, 6 – ємнісний датчик зміщення, 7 – котушка електромагнітного приводу, 8 – постійний магніт, 9 – підсилювач і підсилювач потужності, 11 – аналого–цифровий перетворювач, 12 – комп’ютер, 13 – станина

Нижче наведено технічні характеристики установки:

1. Діапазон вимірюваних глибин занурення індентора в матеріал: у межах від 1 нм до 10 мкм з точністю не гірше за 1 нм;

2. Діапазон тимчасових параметрів навантаження: від 2 мс до 1000 с при роздільній здатності не гірше 0,1 мс;

3. Діапазон навантажень: від 1 мН до 400 мН при роздільній здатності навантаження не гірше 10 мкН;

4. Здатність навантаження ступінчасто–наростаючим імпульсом навантаження, одиночними імпульсами в режимах з варіюванням кількості (1–10), амплітуди сили та тривалості сходів в інтервалах (0,3–10 с);

5. Здатність навантаження імпульсом навантаження трапецеїдальної форми, з часом фронту наростання і спаду навантаження, що варіюється, амплітуди і часу витримки індентора під навантаженням.

Оцінка відносної похибки обчислення твердості в залежності від похибки вимірювання глибини відбитка Δh виконана в [2]:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{h^2}{2}\left[\frac{1}{(\mathrm{h}-\Delta\mathrm{h})^2} - \frac{1}{(\mathrm{h}+\Delta\mathrm{h})^2}\right] \times 100\% . \quad (1)$$

За цією оцінкою, якщо при h_{max}=5 мкм сумарна похибка визначення глибини становить Δh=0,05 мкм, то похибка у обчисленні твердості становитиме близько 2%.Розглянемо можливі причини похибки у визначенні глибини відбитка h докладніше.

Відбиток при першому торканні. Внаслідок впливу деяких зовнішніх факторів (механічні вібрації, температурний дрейф, якість поверхні зразка) ця величина може бути більшою. Її можна оцінити post factum за нахилом початкової ділянки кривої навантаження. Якщо він помітно відрізняється від нахилу інших точок кривої навантаження, то апроксимуючи початкову ділянку P–h діаграми за методом найменших квадратів до перетину з віссю глибин h, ми отримуємо в точці перетину глибину відбитка від першого контакту. Щоб уникнути помилок, кількість точок кривої навантаження, що використовуються для апроксимації, рекомендується брати однаковим при індентеруванні будь–яких матеріалів [3]. В цілому, це джерело похибки може суттєво спотворювати реальну глибину відбитка тільки при малих навантаженнях (менше 10 мН для жорстких керамік), коли він і підлягає обов'язковому обліку.

Пружний прогин вимірювальної системи. Яким би жорстким не було з'єднання окремих механічних вузлів приладу, пружний прогин окремих його елементів існує завжди. Особливо це стосується П–подібної несучої рами, до якої кріпляться всі рухомі елементи наноіндентометра, у тому числі і вимірювальні датчики. Прилад, на якому проводилися вимірювання, відноситься до наноіндентометрів з пружно–податливою вимірювальною системою, як і більшість комерційних нанотестерів. Пружна податливість виникає через те, що нерухомі пластини датчика зміщення кріпляться на несучій рамі конструкції, тоді як у жорстких машинах вони встановлюються безпосередньо на столику зі зразком. Загальна податливість, що вимірюється C_{total} є сума податливості контакту (зразка) $C_{contact}$ і підатливості установки C_{frame}:

$$C_{total} = C_{contact} + C_{frame} . \quad (2)$$

Загальна підатливість установки визначається виразом

$$\frac{1}{C_{total}} = \left(\frac{dP}{dh}\right)_{\max}, \quad (3)$$

де $(dP/dh)_{max}$ визначається нахилом початкової ділянки кривої розвантаження.

Наведений модуль Юнга E_r визначається за формулою Снеддона:

$$E_r = \frac{1}{2\beta}\frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{A_c}}\frac{1}{C_{contact}}, \quad (4)$$

де A_c відповідає площі проекції відбитка при максимальному навантаженні P_{max}, а коефіцієнт β визначається геометрією індентора. Для трикутної піраміди Берковича β=1,034.

Наведений модуль Юнга E_r визначається співвідношенням

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu_s^2)}{E_s} + \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0}, \tag{5}$$

де ν_0 та E_0 – відповідно коефіцієнт Пуассона і модуль Юнга матеріалу індентора (для алмазу ν_0 – 0,07; E_0=1100 ГПа), а ν_s і E_s – коефіцієнт Пуассона і модуль Юнга досліджуваного матеріалу.

Виражаючи з (4) підатливість контакту $C_{contact}$ і підставляючи знайдене значення (2), отримаємо

$$C_{frame} = C_{total} - \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta}\frac{1}{\sqrt{A}}\frac{1}{E_r}. \tag{6}$$

З виразу (6) випливає лінійний зв'язок між C_{total} та $A^{-1/2}$. Підатливість експериментальної установки визначається відрізком, що відсікається графіком функції $C_{total}=f(A^{-1/2})$ від осі підатливості. Експериментально процедура визначення C_{frame} полягала в наступному. При кількох фіксованих величинах навантаження (у діапазоні від 200 до 100 мН) на матеріалі з відомими параметрами ν та E (монокристали A1) отримували відбитки та відповідні P–h діаграми. З нахилу розвантажувальної кривої обчислювалася величина C_{total}. Потім, вважаючи, що діагональ відбитка не відчуває пружного відновлення після повного розвантаження, в оптичному мікроскопі вимірювали довжину сторін відбитка a, і за формулою

$$A_c = 0,433a^2, \tag{7}$$

розраховували площу проекції контакту індентора з матеріалом. Будувався графік залежності $C_{total}=f(A^{-1/2})$ та його перетин з віссю C визначало підатливість установки.

Результати калібрувальних вимірювань наведено на рисунку 2. З них випливає, що підатливість установки дорівнює C_{frame}=0,538 нм/мН=0,538·10^{-6} м/Н.

Знання величини Cframe дозволяє вищелити з вимірюваного переміщення ін– детора htotai пружний внесок машини і отримати справжню глибину занурення індентора в досліджуваний матеріал:

$$h = h_{total} - \varepsilon C_{frame} P. \tag{8}$$

З (8) випливає, що зі зростанням навантаження зростає і величина вкладу податливості машини у сумарне зміщення індентора. Отже, у верхній частині P–h діаграми вплив пружної податливості буде більшим, а це викликає зміну нахилу розвантажувальної кривої та відповідну похибку визначення модуля Юнга.

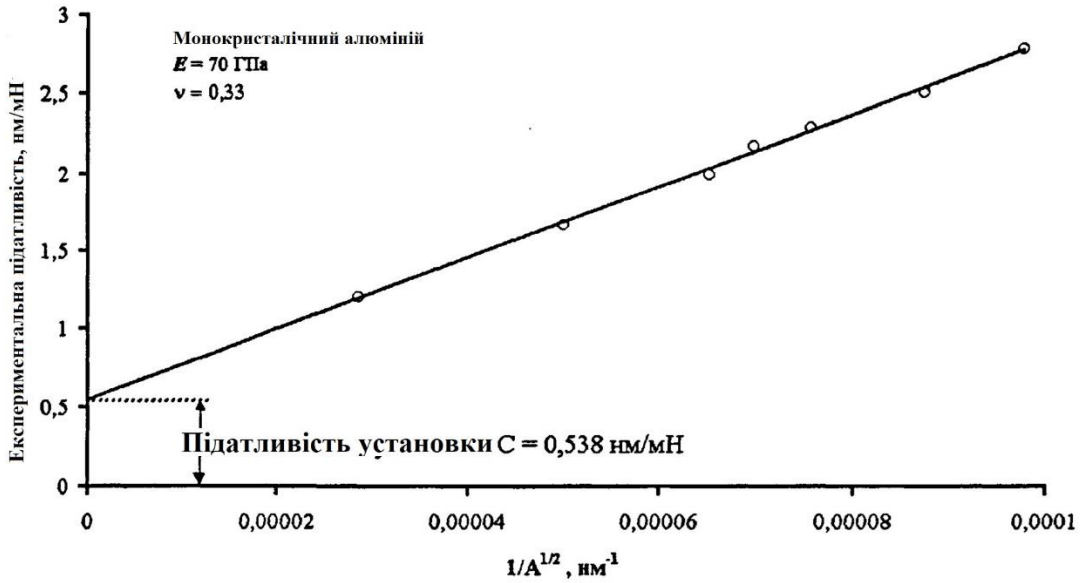


Рисунок 2 – Залежність підатливості C_{total} системи «зразок – установка» від розміру відбитку для монокристалічного A1

Гострота кінчика індентора. Співвідношення $A \square h_c^2$, що використовується при розрахунку твердості, справедливе тільки для ідеально гострих інденторів. Усі реальні індентори мають кінцевий радіус притуплення вершини, зазвичай, у межах від 50 нм до 200 нм. Якщо це не враховувати, то за малих глибин відбитка розбіжність між реальною і видимою глибиною занурення індентора може досягати десятків відсотків. Оцінити гостроту кінчика індентора можна безпосереднім вимірюванням профілю його відбитка в пластичному матеріалі методом електронної мікроскопії, або аналогічно описаної вище процедури калібрування підатливості, тільки при значно менших навантаженнях. Ми користувалися третьою методикою, у якій розмір відбитка безпосередньо не вимірюється. Сутність методу полягає в тому, що ізотропний матеріал (зазвичай використовується плавлений кварц) індентується у широкому діапазоні навантажень для отримання відбитків завглибшки від одиниць до сотень нанометрів. Далі контактна глибина відбитка h_c визначається екстраполяцією початкового нахилу розвантажувальної кривої (як було описано вище). Площа контакту визначається незалежно від h_c з урахуванням реального C_{frame}=0,538 нм/мН та експериментально визначеної жорсткості контакту S=dP/dh згідно з виразом

$$A_c = \frac{\left(\frac{\sqrt{\pi}}{2\beta E_r}\right)}{\left(C_{total} - C_{frame}\right)^2}. \tag{9}$$

Чисельник формули (9) – постійна для даного матеріалу величина, оскільки передбачається, що модуль $E_г$ не змінюється за зміни навантаження. Для плавленого кварцу $E_г$=69,6 ГПа і з урахуванням цього формула (9) набуває вигляду

$$A_c = \frac{1{,}365 \cdot 10^{-4}}{\left(C_{total} - C_{frame}\right)^2}. \tag{10}$$

Залежність площі контакту A_c від глибини пластичного відбитка h_c для індентора Берковича, що використовується в роботі, наведена на рисунку 3. Суцільна лінія відповідає теоретичній площі контакту $A_c = 24{,}56h_c^2$, а пунктирна – реальній площі проекції контакту. Інтерполуючи експериментальні дані поліноміальною функцією, знаходимо для даного індентора формулу реальної площі контакту, яку необхідно використовувати для розрахунку твердості:

$$\begin{gathered} A_c = 24{,}5 \cdot h_c^2 + 1535{,}325 \cdot h_c + 8135{,}254 \cdot h_c^{1/2} + 25538{,}7 \cdot h_c^{1/4} + 0{,}1354 \cdot h_c^{1/8} - \\ -0{,}5235 \cdot h_c^{1/16} + 30{,}724 \cdot h_c^{1/32} - 302{,}967 \cdot h_c^{1/64} - 20{,}64 \cdot h_c^{1/128}. \end{gathered} \tag{11}$$

З рисунка 3 видно, що розбіжність реальної та ідеальної залежностей $A \sim A(h_c)$ починається при глибині контакту менше 300 нм, а при великих глибинах ідеальна та реальна залежності збігаються. Отже, саме при h_c<300 нм необхідно використовувати формулу (11) при розрахунку твердості.

Форма друку. Утворення навколо відбитка навалів матеріалу, що витісняється з деформованого об’єму, також є одним із джерел похибки вимірювання глибини відбитка, тому що в цьому випадку контактна глибина h_c виходить менше, ніж відсутність навалів. Утворення навалів навколо відбитка характерне для м’яких та пластичних матеріалів і практично не має місця для керамік та ковалентних кристалів. Якщо немає можливості безпосередньо виміряти висоту навалів, то для їх оцінки існують непрямі методи.

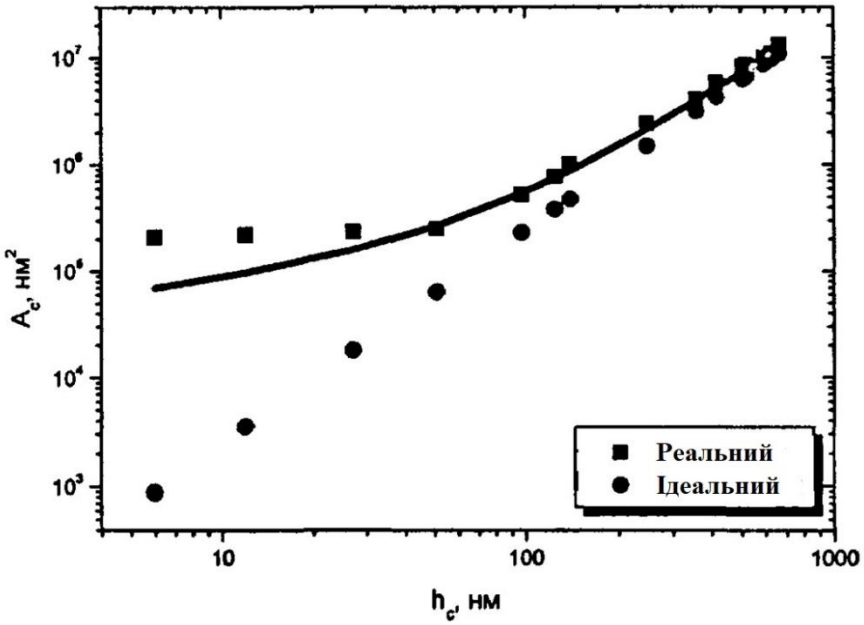


Рисунок 3 – Співвідношення між глибиною та площею проекції контакту для ідеального та реального інденторів. Матеріал – плавлений кварц

Тепловий дрейф. Зміна температури зразка або деталей вимірювальної системи наноіндентометра в процесі вимірювань також є причиною різниці між видимою та справжньою глибиною занурення індентора. Висока чутливість датчика зміщення веде до того, що коливання середньодобової температури в приміщенні в межах ±0,2°C викликає тепловий дрейф індентора зі швидкістю 0,01 нм/с. При швидких вимірюваннях, природно, такий дрейф не робить істотного впливу на результат вимірювань. Інше джерело теплової енергії – джоулеве тепло, що ущільнюється в котушці навантаження. При максимальному навантаженні на індентор в котушці витікає потужність ~250 мВт. Частина цієї теплоти витрачається на нагрівання титанового штока, який розширюється і спричиняє зміщення рухливих пластин датчика. Оцінка зміщення дає (при довжині штока 250 мм) величину $\Delta h/\Delta t$=0,025 нм/с. За часів вимірювання порядку 10 с ним можна знехтувати.

Шорсткість поверхні зразка. Будь–яка поверхня, навіть відшліфована за вищим класом чистоти, містить на поверхні неоднорідності, висотою в десятки нанометрів на відстані між окремими піками в десятки і більше. В результаті, при першому контакті індентор може торкатися зразка всього в кількох точках (і необов'язково гострою вершиною), що веде до завищення контактної глибини занурення та відповідного заниження контактної площі. На практиці, розмір шорсткостей повинен враховуватися, як і гострота вершини індентора. Якщо цього не робити, то вимірювання на глибинах менше 20 нм не можна вважати достовірними.

Похибка вимірювання глибини та навантаження. Так як навантаження і зміщення вимірюються з великою точністю, їх вплив на точність обчислення твердості може бути оцінена стандартним способом – логарифмуванням та диференціюванням формули (12):

$$\frac{\Delta H}{H}=\frac{\Delta P}{P}\left(1+\frac{2}{\left(h_{tot}/(\varepsilon \mathrm{C_1 P})\right)-1}\right)-2\frac{\Delta h}{h}. \qquad (12)$$

З (12) випливає, що похибка $\Delta P/P$ залежить від жорсткості контакту l/C_s. Для випадку пружно–пластичної деформації $\varepsilon\approx 2$ і при фіксованих ΔP та Δh похибка визначення твердості не перевищує одиниць відсотків і стає ще меншою зі зростанням величини навантаження.

Шуми та післядія в системі при розвантаженні. На розвантажувальній гілці P–h діаграм іноді спостерігаються хаотичні злами. Є кілька причин для пояснення цього: а) флуктуації шуму вимірювальних датчиків внаслідок теплових флуктуації, механічних вібрацій, нестабільності напруги живлення і т.д.; б) післядія зразка в процесі розвантаження (повзучість, в'язко–пружна поведінка, релаксація напружень); в) мінливість коефіцієнта тертя між індентором та зразком. Ці процеси мають переважно випадковий характер і їх неможливо повністю виключити у таких

прецизійних вимірах. Послабити їх вплив можна шляхом усереднення результатів якомога більшого числа вимірювань за однакових умов.

Пружні постійні індентори. У формулі (5) для розрахунку наведеного модуля Юнга матеріалу фігурують коефіцієнт Пуассона та модуль Юнга матеріалу індентора. Природні алмази, що використовуються для виготовлення інденторів, мають розкид значень модуля Юнга від 800 ГПа до 1200 ГПа. Крім того, значення Е для індентора залежить ще від кристалографічної орієнтації алмазу. Враховуючи, що зазвичай у розрахунках береться величина Е=1000 ГПа, це призводить до різниці порядку 8–10% між видимим і дійсним значенням модуля пружності матеріалу (а, отже, і площі контакте).

Розсіювання властивостей матеріалу. Негомогеність механічних властивостей на макро– і мікроструктурному рівні може викликати великий розкид значень твердості на різних ділянках одного і того ж зразка. Статистичні методи усереднення допомагають оцінити та зменшити вплив цього фактора на точність вимірювань.

Висновки. Таким чином, є можливість планування експериментів з наноіндентерування з урахуванням впливу випадкових та систематичних джерел похибки, та вжиття всіх можливих заходів щодо усунення (або ослаблення) їх впливу на результати експерименту.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гаврилюк Д. В., Мельниченко М. М., Жук Я. О. Нанорозмірні плівки: особливості структури та методики наноіндентування. Прикладна механіка. 2022. Т. 58, № 5. С. 52-60.

2. Коржов І. М., Кравченко Я. О., Борисенко Є. А. Аналіз основних складових похибки визначення твердості за методом Брінелля з використанням оптичних систем. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2021. № 4(70). С. 105-113.

3. Галанов Б. О., Іванов С. М., Картузов В. В. Розширена характерізація матеріалів на основі неперервних діаграм інструментального індентування. Наукові нотатки. 2021. Вип. 71. С. 268-276.

УДК 621.762

Коць Б. С., Лапченко Ю. С.
Луцький національний технічний університет

СПОСОБИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА УПРАВЛІННЯ СТАНОМ МАГНІТНОГО ВИХОРУ

У статті описано проблеми дослідження нанорозмірних феромагнітних систем. Розглянуто експериментальне дослідження з перемикання полярності p вихрового ядра за низьких полів. Розглянуто особливості магніто-силової мікроскопії. Описано метод управління за допомогою спін-поляризованих струмів. Розглянуто спостереження мод низької частоти та методи спостережень азимутальних високочастотних мод. Описано методи спостереження вихрової структури та подвійного вихрового стану.

Ключові слова: наноточка, кіральність, нанодиск, магнетика, магнітний вихор.

Kots B., Lapchenko Y. Ways to observe and control the magnetic voltage mill. The article describes the problems of tracking nanoscale ferromagnetic systems. Experimental research on the reversal of the polarity p of the vortex core at low fields is reviewed. The features of magnetic force microscopy are examined. A method for controlling additional spin-polarized streams is described. The protection of low-frequency modes and methods of protection of azimuthal high-frequency modes are examined. Methods for controlling the vortex structure and the under-winding vortex mill are described.

Keywords: nanodot, chirality, nanodisk, magnetism, magnetic vortex.

Постановка проблеми. Дослідження нанорозмірних феромагнітних систем є актуальним для створення пристроїв надщільного запису інформації, пристроїв спінтроніки та ін. Проблема створення дешевої енергонезалежної оперативної пам’яті з довільною вибіркою MRAM (magnetic random access memory), що володіє швидкодією, порівнянною з SRAM при ємності чіпа в кілька Гбайт, може бути вирішена з використанням феромагнітних наноточок з вихровою магнітною структурою [1]. Можливість одночасної роботи контролера з масивом наноточок, висока стабільність осередків пам’яті через малу величину полів розсіювання, робить перспективним

створення MRAM на основі наноелементів. У цьому ще мало вивчено вплив взаємодії магнітних підсистем елементів на властивості масиву Теоретичні розрахунки, як правило, проводять без урахування дисипації і лише для певних значень кіральності та полярності вихорів. Розробка надійного методу управління кіральністю та полярністю магнітного вихору далека від завершення. У літературі обговорюється декілька способів керування станом магнітного вихору.

Метою роботи є аналіз проблеми дослідження нанорозмірних феромагнітних систем та їх експериментальне дослідження.

Викладення основного матеріалу.

Короткі імпульси магнітного поля. Експериментальне дослідження з перемикання полярності р вихрового ядра за низьких полів проводилося наприклад, в [1]. Порушення вихору в наноточках здійснювалося синусоїдальним магнітним полем у площині зразка (рис. 1), в результаті чого виникав гіротропний рух вихрового ядра щодо становища рівноваги.

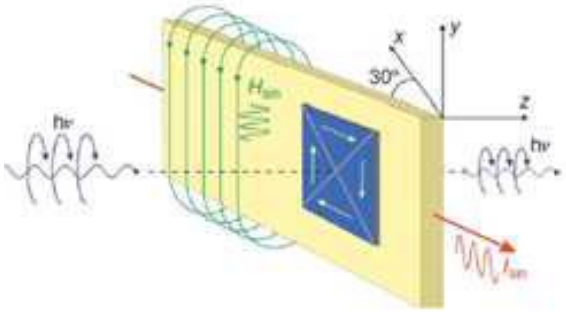


Рисунок 1 – Схема досліду вивчення перемикання полярності вихрового ядра [1]

В [1] вивчалася динаміка збудження вихрового ядра, причому спостерігався рух вихору по спіралі після подачі потужних імпульсів поля. З'ясувалося, що після подачі короткого імпульсу виникає початкове лінійне прискорення ядра у площині магнетика. Потім слідує кероване гіротропне обертання. Кіральність не корелює з напрямком початкового прискорення чи напрямом обертання ядра. Крім того, у цій роботі показано, що субнаносекундні імпульси магнітного поля (менше часу релаксації), прикладеного у площині, спочатку зміщують ядро колінеарно доданого полю.

Отже, виникає необхідність вивчення динаміки намагніченості у таких тимчасових масштабах.

Магнітно-силова мікроскопія Автори [1] вивчали процес перемикання кіральності в еліптичних наноточках Co розміром 400x600x27 нм з допомогою зонда магнітно-силового мікроскопа. Було показано, що за зменшенні відстані зонд-зразок у процесі сканування наноточки від 50 нм до 15 нм, її кіральність змінюється на протилежну. У [1] методом магнітно-силової мікроскопії вивчалися багатошарові структури [Co/Si]×3 одержані методом електронно-променевої літографії. Було показано, що вихровий стан виникає, якщо енергія магнітостатичної взаємодії між сусідніми дисками досить велика порівняно з енергією взаємодії шарів.

Управління за допомогою спін-поляризованих струмів. У [1] автори досліджували гіротропний лінійний і нелінійний рух магнітного вихору в магнітом'яких циліндричних наноточках шляхом мікромагнітного моделювання та розв'язання рівняння руху Тіля. Було виявлено, що полярність ядра може бути переключена динамічно не лише шляхом маленьких амплітуд коливань магнітного поля, а й за допомогою змінних струмів [1]. Перемикання полярності р вихрового ядра відбувається на частоті, що дорівнює резонансній частоті вихору. Перемикання полярності спричинене сильним полем, яке виникає локально за рахунок обертального руху ядра при високій швидкості (кілька сотень метрів за секунду).

У [1] представлений метод управління кіральністю магнітного вихору пермалоєвому нанодиску, на якому була сформована страйп структура з кобальту. Виявлено, що напрямок кіральності при зародженні вихору залежить від орієнтації однодоменного стану у нанострайпі, які можуть контролюватись зовнішнім магнітним полем. При цьому сам страйп не впливає на поле зародження та анігіляції вихору.

Це важливий крок до реалізації пристроїв магнітної пам'яті на наноточках, тому фундаментальне розуміння руху вихрового ядра є важливим, особливо за умов резонансу.

Спостереження мод низької частоти. На даний момент виявлено два якісно розрізняються режими руху намагніченості в наноточках: гіротропне (низькочастотний режим збудження) [1] та високочастотні радіальні та азимутальні моди [1]. Хоча резонансне збудження гіротропного руху інтенсивно вивчається, багато динамічних властивостей вихрової структури ізольованих наноточок та їх масивів залишаються неописаними. Наприклад, залишається незрозумілим механізм зародження пари вихор-антивихор, а також цікавий характер нелінійного коливання магнітного вихору та вплив на моди коливань магнітостатичного взаємодії між наноточками у складі масиву [1].

Автори [1] спробували описати рух вихрового ядра шляхом розгляду суперпозицій власних мод, а також вивчаючи асиметричний ефект резонансу. Вони застосували мікромагнітне чисельне моделювання динаміки вихору, засноване на використанні рівняння руху Ландау-Ліфшитця-Гілберта (1), і провели аналітичні розрахунки, засновані на рівняння руху Тіля для дисків з пермалою товщиною 10 нм та діаметром 300 нм у діапазоні частот від 100 до 825 МГц. Дослідники виявили, що два резонансні збудження власних мод сильно асиметричні щодо вихрової поляризації. Власні моди визначають подовження та орієнтацію траєкторій ядра вихору.

$$\frac{dm}{dt} = \gamma m \times H \ . \tag{1}$$

Автори [1] вивчили поведінку наноструктури типу «маленький диск на великому», у разі гіротропного руху вихору у великому диску з пермалою діаметром 600 нм та товщиною 35 нм. Ними використовувався метод мікромагнітного моделювання. Було встановлено, що можливо за певних умов здійснити перемикання кіральності в малому диску діаметром 200 нм та завтовшки 35 нм за час ~ 5 нс.

В [1] представлено експериментальне виявлення низькочастотних мод, відповідних обертанню вихрового ядра біля положення рівноваги. Експериментально показано, що магнітне поле, прикладене в площині зразка, мало впливає на резонансну частоту, зрушуючи її в межах 5%. Цей вплив стає помітним при полях, близьких до поля анігіляції вихору.

Продуктивним вивчення динамічних властивостей магнітних вихорів є використання компланарного хвилеводу як відображення [1]. Однак цей метод не підходить для дослідження феромагнітного резонансу широкому діапазоні частот.

Методи спостережень азимутальних високочастотних мод. Розуміння механізму високочастотного збудження мод (спинових хвиль) дозволяє розробити метод контролю перемикання вихору магнітним полем [1]. Азімутальні високочастотні моди викликають спотворення вихрового профілю ядра при перемиканні вихору у перпендикулярному магнітному полі [1].

Існують різні експериментальні методи спостереження азимутальних високочастотних мод [1]. Наприклад, автори [1] провели ряд експериментів з вимірювання збуджень спін-хвильових азимутальних мод. Результати показали, що власні частоти значно нижчі від тих, що отримано комп'ютерним моделюванням.

В [1] були представлені вимірювання азимутальних та радіальних спін-хвильових мод при широкосмуговому феромагнітному резонансі в нульовому магнітне поле. Дослідження проводилися на круглих пермалоєвих нанодиски з вихровою структурою намагніченості. Вимірювання цих авторів добре узгоджуються з представленими даними моделювання [1].

У [1] експериментально та чисельно вивчався цілий набір високочастотних мод гігагерцового діапазону, були отримані залежності H(ω) і досліджено вплив розміру диска на високочастотний спектр. Вивчення мод високої частоти у феромагнітних нанодисках у вихровому стані має особливий фундаментальний та прикладний інтерес.

Методи спостереження вихрової структури. Вивчення вихрової структури проводиться різними експериментальними методами. Мікроскопія магнітооптичного ефекту Керра дозволяє ретельно проаналізувати спін- хвильові збудження, їх частоти, інтенсивність та просторове розподіл [1]. Пов'язані високочастотні спінові хвилі в магнетиці у вихровому стані вперше експериментально виявлено завдяки мікроскопії BLS (світлове розсіювання Бріллюена), яке полягає в розсіянні відбитого світла на акустичній гіперзвуковій хвилі, що генерується наноточкою у збудженому стані

за рахунок магнітострикції [1]. Високочастотні спінові хвилі більш досліджені детально в [1], однак у цих роботах не були виявлені власні частоти в субгігагерцовому діапазоні.

У [2] представлені теоретичні розрахунки радіальних спін-хвильових власних частот та профілів для різного ряду мод у вихровому стані феромагнітних нанодисків. Автори, використовуючи мікроскопію BLS, оптично виявили радіальні спін-хвильові моди високого порядку у вихровому стані. Методом BLS можна виявити розподіл інтенсивностей (вузли та пучності) для радіальних мод до 5-го порядку. Моди понад 5-го порядку не вдається спостерігати через обмежений просторовий дозволу цього методу.

Як вже згадувалося вище, для наноточок у формі циліндра стан, при якому однорідний вихор займає весь об'єм диска є основним. Але також можлива поява та інших метастабільних (МС) станів (рис. 2). Їх можна охарактеризувати деякими фізичними властивостями, які змінюються до переходу до іншого МС чи стабільний стан.

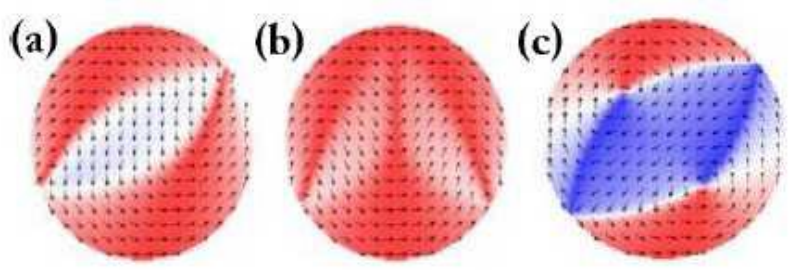


Рисунок 2 – Метастабільні стани: (a) S-стан; (b) T-стан (c) Подвійний вихровий стан [2]

МС стану, які можуть з'являтися в магнітних нанодисках, можуть бути класифіковані як S-стану (рис. 2, a), T (трикутник)-стану (рис. 2, b) та подвійний магнітний вихор (DMV) (рис. 2, c), іноді таку конфігурацію називають "алмазною". У DMV є два вихори схожі один на одного і мають компонент M_z у вигляді ядра. Як правило, поляризація цих ядер p_1 p_2 є випадковою. Метастабільні стани можуть бути описані з точки зору знаходження системи в потенційній ямі, як у пастці, протягом деякого проміжку часу. Магнітна система може бути в ній протягом дуже короткого або дуже тривалого періоду часу, перш ніж вона зрештою повертається в основний вихровий стан. Висота енергетичного бар'єру, який система повинна перейти для того, щоб подолати локальний мінімум енергії, визначає стабільність цього стану. Існування метастабільних станів суттєво залежить від розмірів магнітних точок [3]. У [3] було виділено три МС (рис. 3, a).

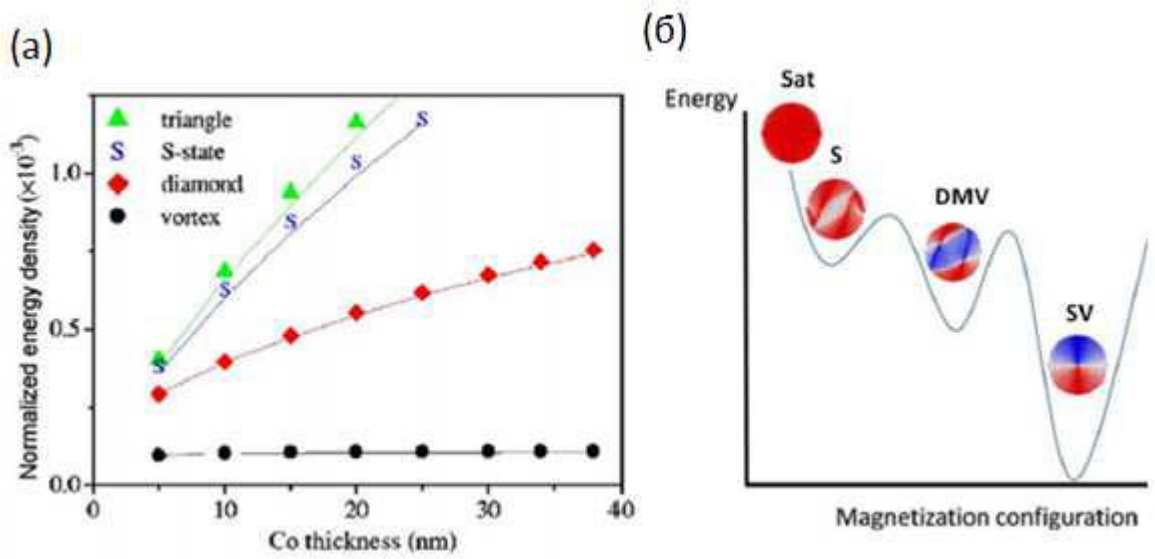


Рисунок 3 – (a) залежність щільності магнітної енергії від товщини для Co циліндрів діаметром 1,65 мкм. (б) схематичне зображення енергії в різних МС та основного стану (SV) [1]

З цього графіка видно, що основним станом буде однорідний магнітний вихор, тому що він знаходиться в області найнижчої енергії. Енергії різних магнітних станів залежить від товщини точок. Так, для самих Невеликі точки різниця енергії між різними МС зменшується. Схематично зображення енергії у різних МС представлені на рисунку 3, б. Зазвичай під час переходу системи з області максимальної енергії (насиченого стану) в основне вихрове, вона проходить через локальні мінімуми енергії, що відповідають різним МС.

Подвійний вихровий стан. Представляє інтерес характер динамічних взаємодій між ядрами у подвійному вихровому стані. У [3] проводиться ряд експериментів з вивчення динаміки намагніченості в круглих пермалоєвих наноточках, у подвійному вихровому стані. Також у нині стало актуальним завдання дослідження взаємодії масивів магнітних наноточок. У [3] досліджено зв'язок між обертаннями вихорів у з'єднаних структурах подвійних дисків. У [3] дається уявлення про механізм зв'язку між ядрами. Автори відзначають найбільш значущі результати цієї взаємодії: зниження резонансної частоти пов'язаних мод і асиметрія діапазону.

Хоча природа збуджених станів доменних стінок і збуджених вихрових станів є добре вивченими [3], механізм збудження спінових хвиль в магнітних структурах, що включають вихори і доменні стінки залишається незрозумілим. В експериментах досліджено еволюцію широкосмугових динамічних характеристик наноточки як функція повільно мінливого магнітного поля в площині.

Висновки. Оскільки інтерес до розуміння процесів, що відбуваються в феромагнітних наноточках, у світі посилюється, а методика управління кіральністю і полярністю вихору далека від досконалості, залишається актуальним у галузі реального та комп'ютерного експериментів розвиток методик управління кіральністю вихору та полярністю ядра, а також вивчення високочастотних режимів руху намагніченості вихору та феромагнітного резонансу з урахуванням згасання, магнітопружних ефектів та міжелементного взаємодії.

У зв'язку з цим завдання, пов'язані з розробкою експериментальних методик вивчення руху в магнітних полях, і теорія цього руху стають особливо актуальними.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Магнетики в електроніці. Навч. посіб. Уклад.: Ю. М. Поплавко, О. В. Борисов, І. П. Голубєва, Ю. В. Діденко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 365 с.

2. Gyakushi, T., Amano, I., Tsurumaki-Fukuchi, A. et al. Double gate operation of metal nanodot array based single electron device. Sci Rep 12, 11446 (2022). https://doi.org/10.1038/s41598-022-15734-1.

3. Novais, Erico & Landeros, Pedro & Barbosa, A. & Martins, Maximiliano & Garcia, Flavio & Guimarães, Alberto. (2021). Properties of magnetic nanodots with perpendicular anisotropy. Journal of Applied Physics. 110. 053917. 10.1063/1.3631081.