



Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Факультет автоматизації,
промислової інженерії та екології



АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ – 2026

XII МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
МОЛОДИХ УЧЕНИХ, АСПІРАНТІВ І СТУДЕНТІВ

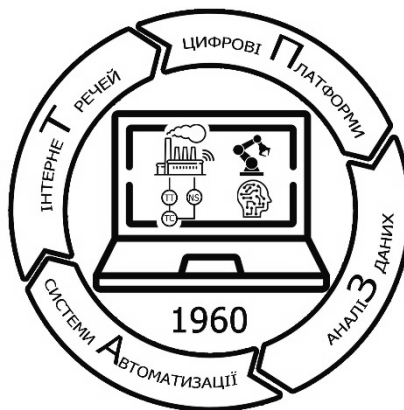
АКІТ – 2026

Київ, 07 травня 2026 року

Матеріали конференції



Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології



КАФЕДРА
ТЕХНІЧНИХ ТА ПРОГРАМНИХ
ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

**АВТОМАТИЗАЦІЯ
ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ – 2026**
XII МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
МОЛОДИХ УЧЕНИХ, АСПІРАНТІВ І СТУДЕНТІВ

АКІТ – 2026

Київ, 07 травня 2026 року

Матеріали конференції

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2026

A22 **Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2026 :**
Матеріали XII Міжнар. наук.-практ. конф. мол. учених, аспірантів і студ. (АКІТ – 2026), Київ, 07 травня 2026 р. [Електрон. ресурс] / уклад. М. В. Лукінюк ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл: 4,5 Мб). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2026. – 119 с. : іл.

ISBN 978-966-990-266-5 (Друк.)

ISBN 978-966-990-265-8 (Ел.)

Наведено матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (АКІТ – 2026)», яка відбулася в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» 07 травня 2026 року. Висвітлено сучасні підходи та методи в автоматизації виробничих процесів, математичному моделюванні технологічних об'єктів, синтезі комп'ютерних систем керування, застосуванні штучного інтелекту, комп'ютерного зору та робототехніки для розв'язання задач контролю і керування.

Для науковців, аспірантів і студентів закладів вищої освіти.

УДК 66.01-52:004](062)

Рекомендовано Вченою радою
факультету автоматизації, промислової інженерії та екології
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
(Протокол № 4 від 27.04.2026 р.)

Відповідальний за випуск

В. С. Цанар, канд. техн. наук, доц.,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Укладання та комп'ютерне верстання *Михайла Лукінюка*

Матеріали подаються в авторській редакції

Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації



КАФЕДРА ТЕХНІЧНИХ ТА ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Кафедра читала курс теорії автоматичного регулювання на різних факультетах (ця традиція підтримується донині). Першими студентами кафедри стали студенти хіміко-технологічного факультету, які висловили бажання отримати спеціальність «Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв». Через рік кафедру перейменували («Кафедра теоретичних основ автоматики і автоматизації хімічних виробництв»), а згодом вона отримала назву «Кафедра автоматизації хімічних виробництв» (кафедра АХВ).

Перший випуск інженерів, підготовлених кафедрою, відбувся 1963 року. Того ж року кафедра перейшла на факультет хімічного машинобудування КПІ. У подальшому кафедру очолювали доцент М. Д. Ступак (1963–1964), професори Р. Я. Ладієв (1964–1977), Ю. О. Остапенко (1977–1984), В. С. Коваленко (1984–1990), М. З. Кваско (1990–2007). З січня 2007 по серпень 2023 кафедру очолював доктор технічних наук, професор Анатолій Іванович Жученко.

У 2020 році відбулося об'єднання кафедри автоматизації хімічних виробництв та кафедри кібернетики хіміко-технологічних процесів в єдину кафедру під назвою «Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації» (кафедра ТПЗА).

З вересня 2023 року завідувачем кафедри ТПЗА є кандидат технічних наук, доцент Цапар Віталій Степанович.

На кафедрі працюють 33 викладачі, серед яких 2 професори, 13 доцентів. У різні роки на кафедрі працювали відомі вчені – професори О. М. Крижанівський, А. З. Грищенко, В. М. Кунцевич.

була створена на хіміко-технологічному факультеті КПІ наказом ректора О. С. Плигунова № 434 від 2 червня 1960 р. Згідно з наказом вона отримала назву «Кафедра теоретичних основ автоматики», її першим завідувачем став відомий спеціаліст з теорії автоматичного регулювання професор Корнілов Юрій Георгійович, автор першого в СРСР підручника з теорії автоматичного регулювання.

Колектив кафедри за короткий час створив лабораторну базу, займаючись одночасно підготовкою курсів лекцій і навчанням студентів. Викладачі кафедри читали курс теорії автоматичного регулювання на різних факультетах (ця традиція підтримується донині).

За час існування кафедри підготовлено тисячі фахівців з автоматизації технологічних процесів (інженерів, спеціалістів, бакалаврів, магістрів), у тому числі сотні іноземців, виконано значний обсяг науково-дослідних робіт, результати яких впроваджено на десятках підприємств України та далеко за її межами. Випускники кафедри успішно працюють програмістами у ІТ-компаніях, банках, керівниками відділів автоматизації на підприємствах, інженерами у науково-дослідних та проектних організаціях.

Кафедрою проводиться підготовка бакалаврів, магістрів і докторів філософії за спеціальністю G7 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

У грудні 2024 року освітньо-професійна програма першого (бакалаврського) рівня вищої освіти акредитована Румунським агентством з оцінювання якості вищої освіти та отримала сертифікат визнання EUR-ACE® Label.

Сьогодні кафедра ТПЗА має в своєму розпорядженні сучасні навчальні лабораторії автоматики та мікропроцесорної техніки, технологічних вимірювань і приладів, а також комп'ютерні та мультимедійні класи, центр дистанційного навчання, лабораторію робототехніки.

Студенти кафедри вивчають програмування, теорію автоматичного керування, прийняття рішень, технології штучного інтелекту, інформаційні технології, комп'ютерні мережі, захист інформації, програмування, робототехніку та мікропроцесорну техніку.

Викладачами та співробітниками кафедри видано понад 300 підручників, навчальних посібників і монографій, оприлюднено тисячі наукових публікацій, отримано сотні авторських свідоцтв на винаходи та патентів.

Адреса кафедри: 03056, Київ, пр-т Берестейський, 37, корпус № 19;

e-mail: tpza@kpi.ua;

сайт: <https://tpza.kpi.ua>.

Щорічно весною проводиться Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ).

Матеріали конференцій друкуються у вигляді збірників, а також розміщуються в електронному варіанті на сайті кафедри та в електронному архіві КПІ ім. Ігоря Сікорського.

ANALYSIS OF FACTORS DETERMINING THE QUALITY OF PHARMACOLOGICAL PRODUCTS IN THE CONTEXT OF THEIR AUTOMATED CONTROL

Zghurskyi D. O., Sazonov A. Yu., Kuchkin O. M.
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, d.zgursky@kpi.ua

Any pharmacological product has its physical, chemical, and biological properties, compliance with which during its production is mandatory to achieve the required clinical effect. Medicines should have a therapeutic and palliative effect and in no way harm the patient, or at least not have unnecessary risks. It is these limitations and the general purpose of such products that put quality in the first position.

The quality of pharmaceutical products is determined by regulations, recommendations, and standards. Mandatory regulations define a clear baseline that companies must follow and are the absolute minimum: cGMP, FDA 21 CFR Part 210, FDA 21 CFR Part 211, 21 CFR Part 11, Eu GMP Annex 11. Recommendations provide supplements to the regulations and are developed to integrate modern quality management strategies: ICH Guideline Q10, ISPE GAMP5. Industry standards implement general principles of quality management: ISO 9001:2015.

Every product has a comprehensive description of desired quality, safety, and efficacy characteristics, which are key components of pharmaceutical development. All this forms the Quality Target Product Profile (QTPP). The specified final quality is expressed in the QTPP, and the real current quality is expressed in Critical Quality Attributes (CQA). CQA act as physical, chemical, or biological characteristics of the finished product that are controlled for safety and efficacy. For solid finished dosage forms, CQAs are: description, crushing strength, friability, assay, impurity profile, uniformity, disintegration, microbiological purity, etc. For liquid dosage forms: clarity and color, pH value, assay, sterility, dosage uniformity, absence of visible particles.

Two types of parameters directly affect the CQA: Critical Material Attributes (CMA) and Critical Process Parameters (CPP). CMA represents the characteristics of raw materials and inputs, such as active pharmaceutical ingredients, excipients, or packaging components. CPP are parameters of the manufacturing process that must be controlled and managed, for example, mixing time in a reactor or the compression force of solid dosage forms. Thus, product quality management in pharmaceutical production occurs according to the principle shown in the figure 1.

Traditional quality control approaches were used in batch production: samples taken from a finished batch were analyzed for compliance with the QTPP, and based on the results, the batch was either released or rejected. Modern manufacturing is moving towards the Quality by Design (QbD) approach, where quality control turns from a single final stage into a continuous one throughout the entire production process. The basis of QbD is Process Analytical Technology (PAT), the essence of which is to integrate quality management into material flows in operating units and analyze the product without destroying it.

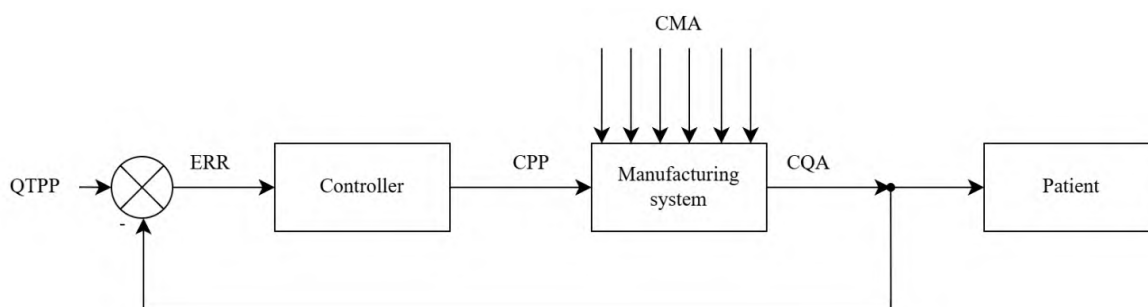


Figure 1. Simplified quality management system according to ICH Q8 [1]

Currently, methods based on machine vision are spreading, where an RGB camera with image analysis algorithms acts as a sensor for controlling color, geometric parameters, substance uniformity, and the presence of damage.

Quality Risk Management (ICH Q9) serves as the bridge between factor analysis and automation, providing a science-based justification for selecting critical control points. Modern systems move beyond passive monitoring to implement dynamic closed-loop control, where real-time data from PAT sensors and machine vision systems allow for instantaneous adjustments to process parameters. This approach ensures both product quality and adherence to rigorous data integrity standards (ALCOA+).

Furthermore, the integration of Machine Vision and AI necessitates a robust validation framework to ensure algorithmic transparency and reproducibility within Good Practice environments. The shift towards Industry 4.0 is facilitated by standardized communication protocols, enabling seamless data exchange between analytical sensors and robotic actuators. This technological synergy allows for the development of Digital Twins, which can predict CQAs in real-time. Ultimately, the goal of such automated systems is not only to eliminate defects but also to optimize process efficiency by minimizing False Reject Rates, thereby harmonizing patient safety with manufacturing productivity.

The culmination of quality control technologies in pharmaceuticals is Real-Time Release Testing (RTRT). This approach allows releasing a product batch without long laboratory final tests that can take up to a month [2].

Thus, the quality of pharmaceutical products is expressed in CQA and depends on the regulation of CPP and the control of CMA. Modern quality management approaches consist of continuous analysis of processes in production units using PAT technologies, which significantly increase quality and reduce production risks.

1. International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use. (2009). *Pharmaceutical development Q8(R2)*.

2. Mohseni-Motlagh, S. F., Dolatabadi, R., Baniassadi, M., & Baghani, M. (2023). Application of the Quality by Design Concept (QbD) in the Development of Hydrogel-Based Drug Delivery Systems. *Polymers*, 15(22), 4407. <https://doi.org/10.3390/polym15224407>.

ОПТИМІЗАЦІЯ ТА АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ КОМБІНОВАНОЇ ЕЛЕКТРОХІМІКО-МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СФЕРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

Денисюк В. Ю., Гончарук Ю. В.

Луцький національний технічний університет, v.denysiuk@lntu.edu.ua

У сучасному машинобудуванні особливу увагу приділяють підвищенню якості та надійності відповідальних деталей, що працюють в умовах інтенсивного зносу та агресивних середовищ. До таких елементів належать сферичні поверхні запірної арматури гідросистем, які повинні характеризуватися високою зносостійкістю, корозійною стійкістю та низькою шорсткістю поверхні. Одним із перспективних методів забезпечення зазначених характеристик є комбінована електрохіміко-механічна обробка (ЕХМО), яка поєднує процеси електрохімічного осадження матеріалу та механічного впливу інструмента [1, 2].

Разом із тим, ефективність процесу ЕХМО значною мірою визначається стабільністю технологічних режимів та узгодженістю параметрів обробки. Основною проблемою є забезпечення рівномірності властивостей поверхневого шару, що безпосередньо залежить від точності формування мікрорельєфу. Відсутність адекватних математичних моделей і ефективних систем керування призводить до виникнення дефектів покриття, неоднорідності структури поверхні та зниження якості готових виробів [3, 4].

З позицій теорії управління процес електрохіміко-механічної обробки доцільно розглядати як багатоканальний об'єкт, що складається з двох взаємопов'язаних підсистем: електрохімічної та електромеханічної. Електрохімічний канал включає параметри, пов'язані з процесами осадження матеріалу, і може бути описаний відомими моделями та законами керування. Натомість електромеханічний канал, який визначає кінематику руху інструмента, є критичним з точки зору формування геометрії мікрорельєфу та потребує вдосконалення методів керування.

Аналіз існуючих підходів показує, що ручне регулювання параметрів процесу не забезпечує необхідної точності та стабільності обробки, що зумовлено вузьким діапазоном допустимих режимів. Особливо це проявляється при обробці сферичних поверхонь, де необхідно реалізувати складний просторовий рух інструмента. У зв'язку з цим актуальною є задача розробки автоматизованої системи керування, здатної забезпечити оптимальні кінематичні режими обробки.

З метою підвищення рівномірності формування мікрорельєфу запропоновано використовувати схему обробки з двома обертальними рухами: обертанням деталі та одночасним обертанням інструмента. На відміну від традиційних схем із зворотно-поступальним рухом, такий підхід дозволяє формувати регулярну сітку мікрорельєфу на поверхні деталі.

Траєкторія руху інструмента у цьому випадку описується як просторова крива, що задається функцією трьох змінних $f(r, \Theta, \varphi)$, де r – радіус сфери, Θ – кут повороту інструменту, φ – кут повороту деталі. Основним параметром якості

сформованої поверхні є кут перетину ліній мікрорельєфу γ , який повинен залишатися сталим по всій площі обробки.

З точки зору теорії управління об'єкт дослідження може бути представлений у вигляді технологічного об'єкта управління з вектором вхідних координат, до складу якого входять геометричні та кінематичні параметри (r, Θ, φ), а вихідною координатою є кут сітки γ . При цьому розмір деталі виступає як збурюючий вплив, що обумовлює необхідність реалізації управління за збуренням.

Задача оптимізації процесу формулюється як визначення таких законів зміни кутів Θ і φ , які забезпечують рівномірне заповнення поверхні та сталість кута сітки $\gamma = \gamma_{\text{зад}}$ по всій площі обробки. Таким чином, управління зводиться до синтезу оптимальних кінематичних законів руху інструмента.

Для розв'язання поставленої задачі доцільно застосувати методи автоматичного керування та оптимізації, зокрема:

- синтез програмного керування рухом виконавчих механізмів;
- використання адаптивних алгоритмів для компенсації збурень;
- застосування чисельних методів оптимізації для визначення траєкторій руху;
- впровадження систем зворотного зв'язку для підвищення точності обробки.

Запропонований підхід дозволяє забезпечити узгоджене керування рухами інструмента та деталі, що є ключовим фактором формування рівномірного мікрорельєфу. Оптимізація кінематичних параметрів дає змогу зменшити відхилення геометричних характеристик поверхні, підвищити зносостійкість деталей та знизити рівень браку.

Таким чином, розробка автоматизованої системи управління процесом ЕХМО сферичних поверхонь є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої дозволяє підвищити ефективність технологічних процесів у машинобудуванні. Запропоновані підходи до моделювання та оптимізації можуть бути використані при створенні сучасних інтелектуальних систем керування обробкою складнопрофільних поверхонь.

1. Дзюра В. О., Марущак П. О. Технологічні методи забезпечення параметрів якості поверхонь тіл обертання та їх профілометричний контроль: монографія. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2021. 170 с.

2. Денисюк В. Ю. Автоматизація виробничих процесів в приладобудуванні: електронний посіб. URL: <https://surl.li/dydera> (дата звернення: 25.03.2026).

3. Заблоцький В. Ю., Дахнюк О. П., Марчук В. І. Забезпечення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей машин на операціях механічного оброблення: монографія. Луцьк: «Вежа Друк», 2017. 120 с.

4. Денисюк В. Ю., Пташенчук В. В. Аналіз методів метрологічного забезпечення високоточного контролю похибок механічних пристроїв переміщень об'єктів. *«Перспективні технології та прилади»*. зб. статей. Луцьк: ЛНТУ, 2022. Вип. 21. С. 20-25.

ПРОГНОЗУВАЛЬНА МОДЕЛЬ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ТЕХНІЧНОГО ВУГЛЕЦЮ

Юденко В. В., Бугаєва Л. М.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, yudenko.v.v.-lk51mn@edu.kpi.ua

В роботі представлено рішення задачі класифікації станів складного технологічного процесу із використанням методів машинного навчання [1, 2]. Для виконання дослідження було отримано набір даних з 300 записів, що мають суттєве значення для автоматизації процесу виробництва технічного вуглецю методом термічного розкладання вуглеводнів.

Розглядалися показники трьох ключових датчиків:

- `Temperature_C`: Температура в реакторі (від 1000 до 1500 °C).
- `Flow_Rate_L_min`: Витрата вуглеводневої сировини (від 50 до 150 л/хв).
- `Pressure_atm`: Тиск у системі (від 1.0 до 3.0 атм).

На основі фізичних закономірностей було визначено цільову змінну класифікації `System_Status`, яка може приймати три значення (класи):

Критичний Оптимальний Нестабільний.

Для розв'язання поставленої задачі було проведено серії комп'ютерних експериментів на базі розробленого автором програмного забезпечення в програмному середовищі *Python* із використанням бібліотек *pandas* та *numpy* було згенеровано показники трьох ключових датчиків.

В процесі побудови моделі класифікації стану процесу (критичний, оптимальний та нестабільний) наявні дані було розділено на матрицю вхідних ознак (X) та вектор цільових значень (y). Для валідації отриманої моделі застосовано метод `train_test_split` (80 % даних — для навчання, 20 % – для тестування).

Як алгоритм прийняття рішень було використано `DecisionTreeClassifier` (дерево рішень) з обмеженням глибини пошуку `max_depth=3` для уникнення перенавчання:

```
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.tree import DecisionTreeClassifier
from sklearn.metrics import accuracy_score, classification_report

# 1. Розділяємо дані на параметри (X) та рішення/результат (y)
X = df[['Temperature_C', 'Flow_Rate_L_min', 'Pressure_atm']]
y = df['System_Status']

# 2. Розбиваємо дані на навчальну (80%) та тестову (20%) вибірки
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# 3. Створюємо модель Дерева рішень
# max_depth=3 обмежує глибину дерева, щоб воно не було занадто складним
model = DecisionTreeClassifier(max_depth=3, random_state=42)
```

Рис. 1. Фрагмент основного коду, що реалізує запропонований алгоритм рішення

Після ініціалізації модель успішно пройшла тренування на навчальній вибірці функцією `fit()`.

Для проведення тестування та оцінки точності натренованої моделі було здійснено класифікацію на тестових даних. Метрика `accuracy_score` підтвердила високу точність прогнозування. Функція `classification_report` продемонструвала детальні показники точності для кожного з трьох станів системи:

```

Модель навчена! Точність прогнозів на нових даних: 90.00%

Детальний звіт по класифікації рішень:
              precision    recall  f1-score   support

Критичний (Ризик аварії)          1.00     0.80     0.89         5
Нестабільний (Потребує налаштування)  1.00     0.69     0.81        16
Оптимальний                      0.87     1.00     0.93        39

   accuracy          0.90
  macro avg          0.88
 weighted avg         0.89
    
```

Рис. 2. Показники точності для кожного з трьох станів системи

Для розуміння логіки машинного алгоритму було визначено коефіцієнти важливості кожної ознаки (*model.feature_importances*). Аналіз показав, який саме фізичний параметр має найбільшу вагу при прийнятті рішення про стан системи. Далі було проведено симуляцію роботи системи. Для перевірки прогнозних можливостей моделі на її вхід було подано новий масив даних з умовного пульта керування: температуру 1450 °С, витрату 110 л/хв та тиск 2.8 атм. В результаті метод `predict()` вірно класифікував стан як "Критичний", а метод `predict_proba()` показав рівень впевненості алгоритму у прийнятому рішенні.

В результаті проведених досліджень за допомогою машинного навчання було вирішено задачу класифікації станів складного технологічного процесу. Використана база даних відповідає реальним інженерним умовам автоматизації термічного розкладання вуглеводнів.

Застосування алгоритму `DecisionTreeClassifier` з бібліотеки `scikit-learn` дозволило не лише отримати високу точність передбачень, але й провести глибокий аналіз логіки рішень. Було доведено, що дерева рішень є ефективним інструментом для промислової автоматизації (наприклад, у SCADA-системах), оскільки вони здатні швидко оцінювати ймовірність аварійної ситуації та показувати оператору, який саме датчик є критичним фактором ризику в даний момент.

1. Мюллер А., Гвідо С. Введення в машинне навчання за допомогою Python: посібник для фахівців. O'Reilly Media, 2017. 392 с.

2. Ковалюк Д. О. Технології штучного інтелекту-2. Комп'ютерні технології інтелектуального аналізу даних: методичні вказівки до виконання практикуму для студ. спец. „Автоматизоване управління технологічними процесами”. К.: ТОВ «Аграр Медіа Груп», 2014. 26 с.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЦЕМЕНТНОГО КЛІНКЕРУ

Денисюк В. Ю., Самутін О. В.

Луцький національний технічний університет, v.denysiuk@lntu.edu.ua

Процес подрібнення цементного клінкеру є одним із ключових етапів виробництва цементу, що характеризується високою енергоємністю, складністю фізико-хімічних перетворень та значною залежністю від гранулометричного складу матеріалу. В умовах підвищених вимог до якості продукції, енергоефективності та екологічної безпеки особливої актуальності набуває задача побудови адекватних математичних моделей даного технологічного процесу [1].

Основною проблемою моделювання процесу подрібнення є наявність невизначеностей, пов'язаних із недостатнім знанням механізмів руйнування матеріалу, стохастичним характером процесів поділу частинок та складністю врахування їх гранулометричних характеристик. Існуючі підходи часто базуються на детермінованих моделях, що обмежує їх застосування в реальних умовах через складність ідентифікації параметрів та значні обчислювальні витрати [2].

Метою роботи є розробка математичної моделі замкнутої схеми подрібнення цементного клінкеру, яка адекватно описує динаміку зміни гранулометричного складу матеріалу та може бути використана як основа для подальшого синтезу систем керування.

У роботі запропоновано підхід до моделювання процесу подрібнення на основі теорії марковських процесів. Згідно з цим підходом, процес подрібнення розглядається як послідовність елементарних переходів частинок між фракціями, що дозволяє врахувати випадковий характер процесу. Кожен елементарний акт подрібнення відповідає переходу Марківського ланцюга.

Математична модель представлена у вигляді матричної схеми, що включає матрицю подрібнення G та матрицю класифікації C . Матриця подрібнення є окремим випадком матриці переходів P та визначає ймовірності переходу частинок із однієї фракції в іншу внаслідок процесу розмелювання.

Вектор стану системи f характеризує гранулометричний склад матеріалу та змінюється в процесі подрібнення відповідно до співвідношення (1):

$$f_1 = f_{0k} = G^k f_0, \quad (1)$$

де f_1 – вектор стану потоку подрібненого клінкеру сепаратора; f_{0k} – вектор стану свіжого клінкеру після k -го переходу; G – результат k переходів матриці подрібнення; f_0 – початковий вектор стану (гранулометричний склад вихідного матеріалу).

Після проходження через млин матеріал надходить до сепаратора, робота якого описується діагональною матрицею класифікації C . Кожен елемент цієї матриці характеризує ймовірність переходу частинок у дрібні фракції відповідно до кривої ефективності сепаратора (ГЕС), отриманої шляхом дискретизації.

В результаті класифікації формуються два потоки матеріалу:

$$f_3 = Cf_1, \quad (2)$$

$$f_2 = (I - C)f_1, \quad (3)$$

де f_3 – потік готового продукту; f_2 – потік крупної фракції, що повертається на повторне подрібнення; I – одинична матриця.

Таким чином, замкнута схема подрібнення (рис. 1) описується системою матричних рівнянь, що дозволяє формалізувати процес циркуляції матеріалу між елементами системи «млин – сепаратор – продукт». Всі матеріальні потоки представлені у вигляді векторів стану, що забезпечує компактність та універсальність математичного опису.

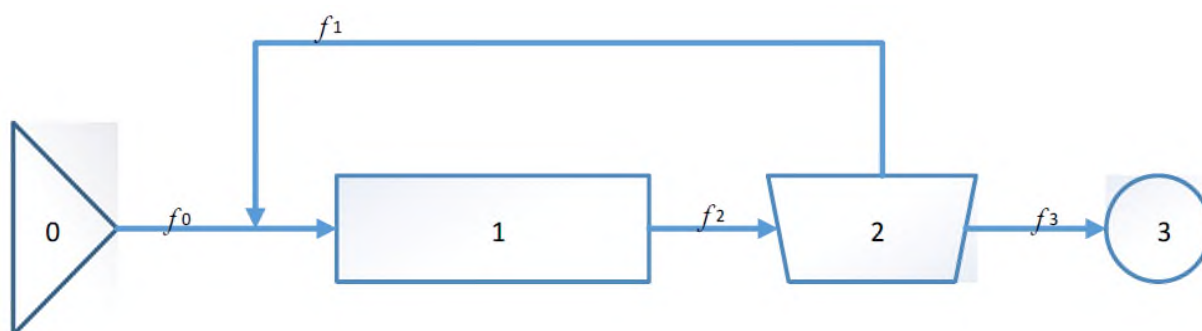


Рис. 1. Матрична модель замкненої схеми подрібнення: 0 – подача сировини; 1 – млин; 2 – сепаратор; 3 – колектор готового продукту

Запропонована модель дозволяє досліджувати динаміку процесу подрібнення, оцінювати вплив параметрів обладнання та властивостей матеріалу на гранулометричний склад продукту, а також визначати усталені режими роботи системи. Важливою перевагою моделі є можливість врахування стохастичних властивостей процесу, що підвищує її адекватність.

На основі розробленої моделі може бути сформована узагальнена матриця переходів для всієї замкненої системи, що дозволяє виконувати ітераційні розрахунки еволюції стану системи у часі. Це відкриває можливість застосування чисельних методів аналізу та оптимізації технологічного процесу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої моделі для:

- аналізу ефективності роботи агрегатів подрібнення;
- прогнозування характеристик готового продукту;
- синтезу алгоритмів автоматизованого керування;
- оптимізації режимів роботи технологічного обладнання.

Таким чином, застосування марковських моделей для опису процесу подрібнення цементного клінкеру дозволяє отримати адекватний математичний опис складного стохастичного процесу та створює основу для подальшого розвитку методів інтелектуального керування технологічними процесами.

1. Хорольський В. П., Коренець Ю. М. Автоматизація виробничих процесів: підручник. Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2022. 400 с.

2. Єремєєв І. С., Кисельов В. Б. Автоматизовані системи управління технологічними процесами: навч. посіб. Одеса : Олді+, 2022. 324 с.

ІМІТАТОР ТЕХНОЛОГІЇ ОБМІНУ ДАНИМИ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМИ ДАТЧИКАМИ

Корнієнко В. В., Складанний Д. М.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, kornienko.victoria@lil.kpi.ua

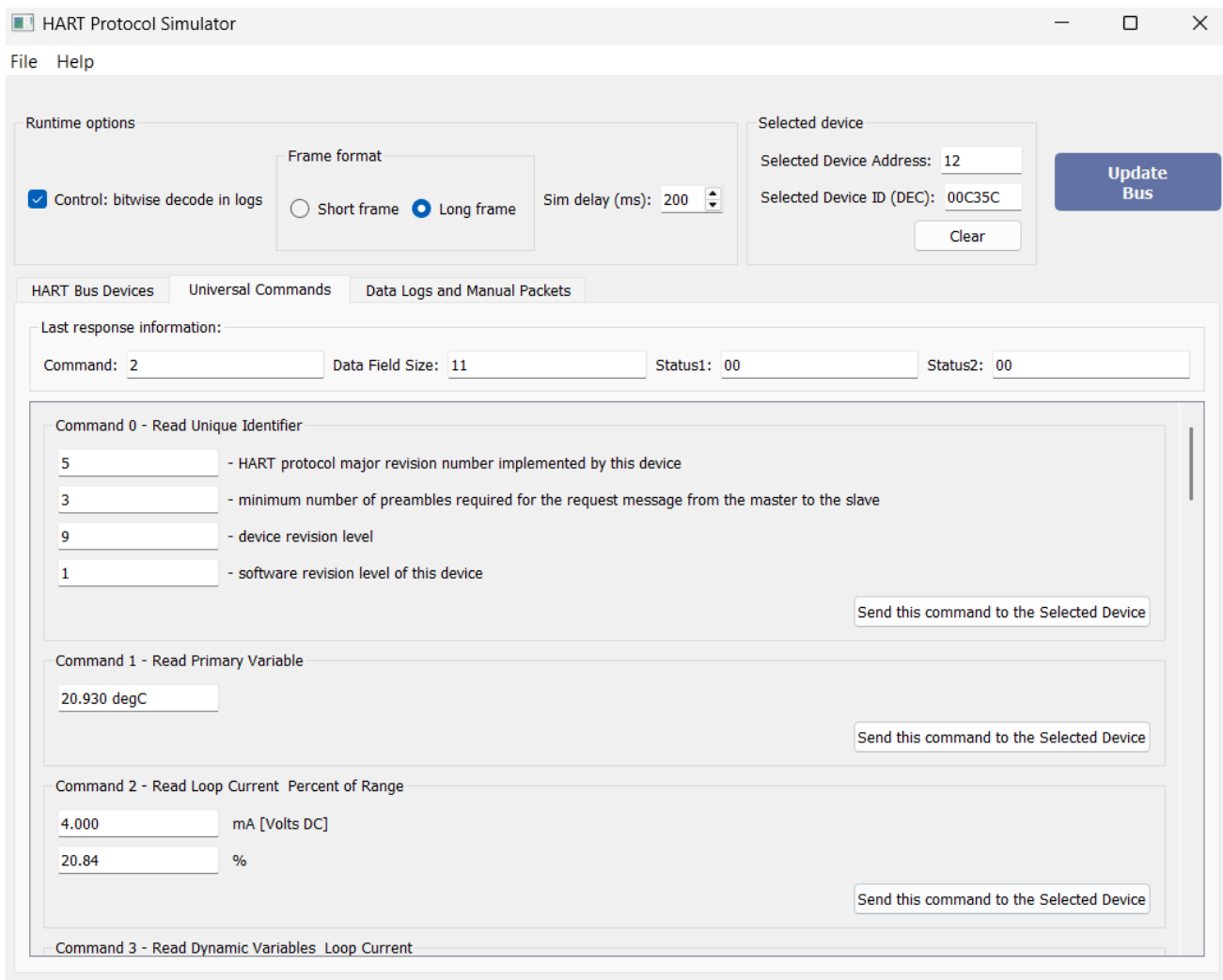
Сучасні системи автоматизації технологічних процесів потребують використання надійних засобів обміну даними між вимірювальними приладами та керуючими системами. Одним із стандартів промислового зв'язку є HART-протокол [1], який забезпечує керування інтелектуальними датчиками шляхом передачі цифрових даних поверх аналогового сигналу. Це дозволяє здійснювати як моніторинг, так і налаштування польових пристроїв. Використання такого підходу дає змогу поєднувати переваги аналогових і цифрових технологій у межах єдиної системи керування. Термін «інтелектуальний» по відношенню до польових пристроїв показує їх здатність перелаштовувати свої параметри або алгоритм роботи по зовнішній команді або адаптивно.

Метою роботи є розробка програмного симулятора HART-протоколу версії 6 для моделювання обміну даними між пристроями у промислових мережах, відтворення взаємодії між головним і підлеглими пристроями, а також дослідження особливостей функціонування протоколу в умовах, наближених до реальних.

У розробленій програмі реалізовано архітектуру типу «головний – підлеглий пристрій», у якій один головний пристрій здійснює обмін даними з 15 підлеглими пристроями. Передача інформації відбувається у режимі багатоточкового підключення, що дозволяє організувати мережу польових пристроїв у межах одного каналу зв'язку. Обмін даними реалізовано шляхом послідовного опитування підлеглих пристроїв головним пристроєм.

У програмі реалізовано набір стандартних, або, у термінології протоколу HART універсальних [2] команд. Команди 0...3 забезпечують зчитування ідентифікаційної інформації та технологічних змінних (первинної, вторинних та додаткових параметрів), що дозволяє отримувати дані з датчиків. Команда 6 використовується для встановлення адреси підлеглого пристрою, що забезпечує коректну роботу мережі у режимі опитування. Команди 11...16 реалізують функції ідентифікації пристроїв, а команди 17...19 – зміну їх параметрів. Додаткові команди (22, 38, 48) забезпечують розширений доступ до статусів та службових функцій пристроїв.

Розроблений програмний засіб має графічний інтерфейс користувача, який забезпечує наочне відображення стану системи, параметрів пристроїв та результатів обміну даними. Передбачено також механізм логування, що дозволяє фіксувати обмін повідомленнями між головним і підлеглими пристроями для подальшого аналізу. Програмний симулятор підтримує можливість гнучкого налаштування параметрів підлеглих пристроїв, зміни сценаріїв обміну даними та дослідження поведінки системи в різних умовах функціонування. Завдяки модульній структурі програму можна розширювати новими командами та типами пристроїв, що підвищує її універсальність і зручність використання.



Графічний інтерфейс симулятора HART-протоколу

Результати роботи показали, що розроблений симулятор забезпечує коректну імітацію обміну даними за HART-протоколом, дозволяє відтворювати роботу мережі польових пристроїв та здійснювати моніторинг технологічних параметрів у режимі реального часу. Програмний засіб може бути використаний для навчальних цілей, тестування алгоритмів автоматизації та попереднього моделювання систем керування без необхідності використання фізичного обладнання.

Таким чином, розроблена симуляція HART-протоколу є ефективним інструментом для дослідження та проєктування сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем керування.

1. What is HART Protocol? [Electronic resource] / Inst Tools // Access URL: <https://instrumentationtools.com/what-is-hart-protocol/>.

2. Hart Protocol Specifications [Electronic resource] / Field Comm Group // Access URL: <https://www.fieldcommgroup.org/hart-specifications>.

ВИЯВЛЕННЯ ПОВЕДІНКОВИХ АНОМАЛІЙ У СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ДОСТУПОМ НА ОСНОВІ *DIGITAL TWIN*

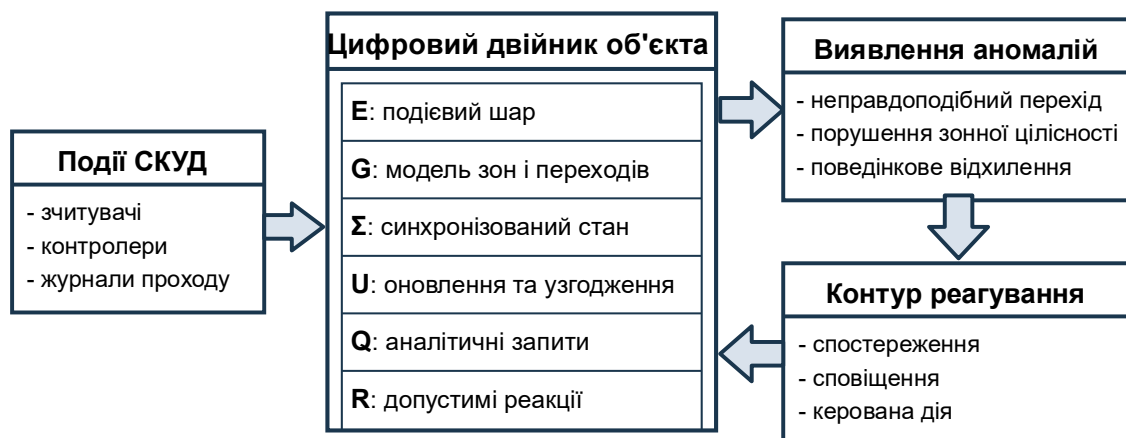
Кучменко Я. О., Савченко Т. В.

Національний університет «Києво-Могилянська академія», yaroslav.kuchmenko@ukma.edu.ua

Системи контролю та управління доступом (СКУД) відіграють важливу роль у захисті критичної інфраструктури, виробничих об'єктів і офісних приміщень. Вони фіксують послідовності подій проходів за допомогою зчитувачів, однак самі журнали не надають повної картини фізичного переміщення користувача всередині будівлі. Основна проблема полягає в тому, що події доступу є дискретними, розрідженими та лише частково спостережуваними, тобто відсутність події в системі не означає, що у фізичному просторі не відбулося змін. Несправність зчитувача, ручний обхід або несанкціонований спільний прохід двох або більше осіб можуть спотворювати просторовий контекст. Враховуючи ці умови, виявлення поведінкових аномалій не може зводитись лише до ізольованого аналізу окремих записів журналів [1], [2].

Поточні підходи показують, що журнали фізичного доступу придатні для виявлення аномальних маршрутів і поведінкових відхилень [1], порушень зонної цілісності та несанкціонованого спільного проходів [2], а також інсайдерської активності [3]. Водночас ці роботи зосереджуються переважно на конкретних детекторах або поведінкових моделях і не вводять спільний синхронізований просторовий стан об'єкта, доступний різним аналітичним модулям [1], [3]. Підходи на основі цифрових двійників у кіберфізичних системах розглядаються як засіб моніторингу стану та аналізу безпекових загроз [4], а також виявлення атак і підтримки керованих рішень реагування [5], [6], проте вони орієнтовані переважно на безперервну телеметрію промислових процесів, а не на дискретні події фізичного доступу. Отже, між аналізом журналів СКУД і цифровими двійниками для кіберфізичних систем зберігається архітектурна прогалина.

Основним внеском роботи є концептуальна архітектурна модель цифрового двійника об'єкта для інтерпретації подій фізичного доступу в умовах часткової спостережуваності, зображена на рисунку.



Концептуальна архітектура цифрового двійника для інтерпретації подій систем контролю та управління доступом

Модель включає подієвий шар E , просторово-топологічну модель зон і переходів G , синхронізований цифровий стан Σ , правила його оновлення та узгодження U , аналітичні запити до стану Q і допустимі форми реагування R . Така побудова задає спільний каркас, у межах якого інтеграція подій, підтримка просторового контексту, аналіз і реагування розглядаються як узгоджені компоненти єдиної системи. Загальну логіку взаємодії цих компонентів подано на рисунку.

Запропонована модель відокремлює подієво-просторовий рівень від конкретних детекторів і дає змогу використовувати спільний цифровий стан для аналізу подій. На відміну від стандартної зонної логіки, вона враховує не лише факт проходу, а й історичний контекст, часово-просторову можливість та врахування невизначеності. Це створює основу для виявлення фізично неправдоподібних переходів, порушень зонної цілісності та поведінкових відхилень користувачів. При виявленні порушення цифровий двійник може передавати результати аналізу в контур реагування, зокрема для сповіщення або ініціювання захисної дії [5]. Коректність запропонованої моделі планується верифікувати на синтетичному трасуванні подій проходу та на сценаріях клонованої картки, фізично неправдоподібного переходу і поведінкового дрейфу з оцінкою коректності відновлення стану та точності ідентифікації аномальних сценаріїв. Таким чином, модель задає архітектурний каркас для подальшої реалізації та порівняння модулів виявлення аномалій у СКУД.

1. Behavior-Based Anomaly Detection in Log Data of Physical Access Control Systems / F. Skorik та ін. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. 2023. Т. 20, № 4. С. 3158–3175.
2. Leveraging Physical Access Logs to Identify Tailgating: Limitations and Solutions / C. Cheh та ін. 2019 15th European Dependable Computing Conference. Naples, 2019. С. 127–132.
3. Data-driven Model-based Detection of Malicious Insiders via Physical Access Logs / C. Cheh та ін. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. 2019. Т. 29, № 4. С. 1–25.
4. A Comprehensive Survey on Digital Twin: Focusing on Security Threats and Requirements / H. Mun та ін. IEEE Access. 2025. Т. 13. С. 73362–73390.
5. Greaves B., Coetzee M., Leung W. S. Digital Twin Monitoring for Cyber-Physical Access Control. Emerging Information Security and Applications. Cham : Springer, 2022. С. 144–158.
6. Digital Twin-Based Cyber-Attack Detection Framework for Cyber-Physical Manufacturing Systems / E. C. Balta та ін. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2024. Т. 21, № 2. С. 1695–1712.

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ СКРЕБКОВОГО ХОЛОДИЛЬНИКА В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА МИЛЬНИХ ТА ВУГЛЕВОДНИХ МАСТИЛ ПЕРІОДИЧНИМ СПОСОБОМ

Стороженко П. О., Плашихін С. В.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, storozenkopasha@gmail.com

Скребковий холодильник – це критично важливий елемент системи терморегуляції у виробництві мильних та вуглеводних мастил періодичним способом. Апарат забезпечує охолодження гарячого продукту, що надходить із реактора. Дотримання заданого температурного градієнта в холодильнику є визначальним фактором для стабільної роботи наступних вузлів лінії та гарантує високу хімічну чистоту кінцевого продукту.

Структурно-параметричну схему скребкового холодильника зображено на рис. 1.

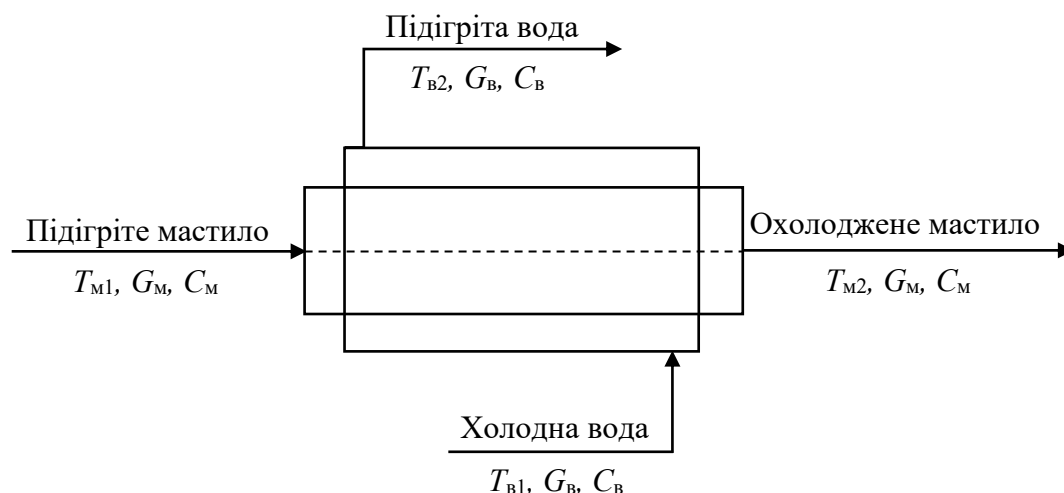


Рис. 1. Структурно-параметрична схема скребкового холодильника

Основні параметри об'єкта представлені в таблиці 1.

Основні параметри об'єкта

Назва параметра	Позначення	Одиниці вимірювання	Значення
Температура мастила на вході до апарату	T_{M1}	К	433,15
Температура мастила на виході з апарату	T_{M2}	К	-
Температура води на вході до апарату	T_{B1}	К	277,15
Температура води на виході з апарату	T_{B2}	К	303,15
Витрата мастила	G_M	кг/с	0,69
Витрата води	G_B	кг/с	-
Питома теплоємність мастила	C_M	Дж/(кг·К)	1680
Питома теплоємність води	C_B	Дж/(кг·К)	4183

Рівняння динаміки має наступний вигляд:

$$G_M C_M (T_{M1} - T_{M2}) - kS(T_{M2} - T_{B2}) = C_M V_M \rho_M \frac{dT_{M2}}{dt}$$

$$G_B C_B (T_{B1} - T_{B2}) + kS(T_{M2} - T_{B2}) = C_B V_B \rho_B \frac{dT_{B2}}{dt}$$

Після лінеаризації та перетворень за Лапласом отримаємо динамічну характеристику за каналом «Витрата води > Температура мастила» у вигляді

$$W_{G_B \rightarrow T_{M2}}(p) = \frac{T_{M2}(p)}{G_B(p)} = \frac{-10.91}{6526p^2 + 169.4p + 1}$$

Динамічна характеристика наведена на рис. 2

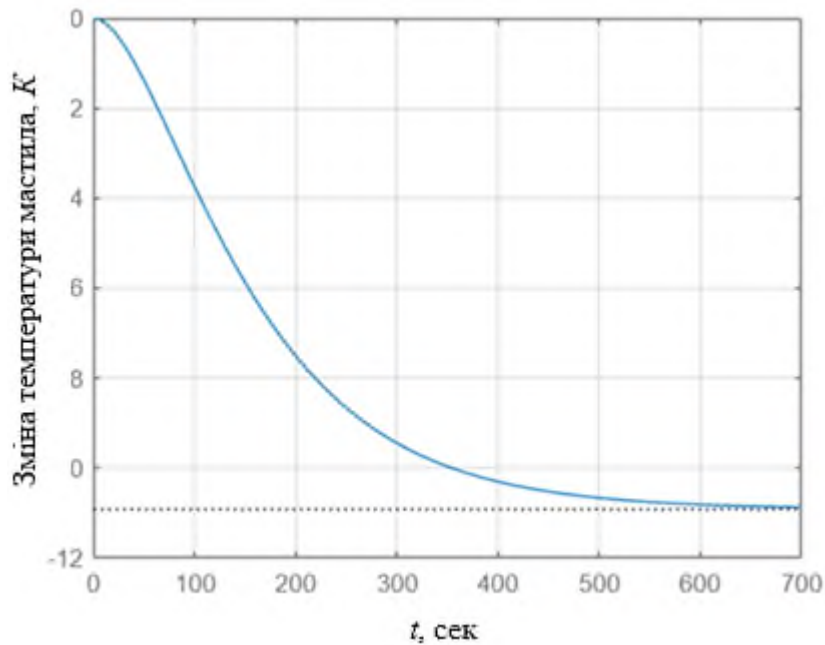


Рис. 2. Динамічна характеристика за каналом «керування»-«вихід»

Розроблена математична модель слугує базою для синтезу системи керування, зокрема для обґрунтування стратегії регулювання та оптимального вибору типу регулятора.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОНТУРУ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ У СИСТЕМІ ВЕНТИЛЯЦІЇ

Мохонько Д. А., Складанний Д. М.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, mokhonko.d.a.-la21@edu.kpi.ua

Сучасні системи вентиляції та кондиціонування базуються на автоматичному керуванні, яке забезпечує підтримання оптимального мікроклімату з мінімальними енерговитратами. Завдяки мережі датчиків, що в реальному часі відстежують рівень витрати повітря та температуру, система здатна самостійно адаптувати об'єми припливного повітря та інтенсивність зміни температури залежно від пори року та присутності людей у приміщенні. Одним із важливих завдань для систем вентиляції та кондиціонування повітря є підтримання заданого температурного режиму. Для ефективного вирішення цього завдання необхідно мати адекватну математичну модель об'єкта. Теплові об'єкти, такі як електричні калорифер і нагрівачі, є ємнісними об'єктами з розподіленими параметрами, які характеризуються значною інерційністю. Динаміку їх роботи описують за допомогою моделі аперіодичної ланки другого порядку. Метою даної роботи є ідентифікація параметрів такої математичної моделі для системи вентиляції на основі експериментальних даних та оцінка її точності [1].

Дослідження проводились на основі отриманого масиву даних з 80 точок, крок дискретизації 3 секунди, які отримані на навчально-дослідницького стенді. У ході експерименту на електричний нагрівач було подано стрибкоподібний керуючий вплив: вхідний сигнал – напруга на нагрівачі, змінився від початкового нульового рівня до значення 184 V. Досліджуваною вихідною величиною обрано температуру на кінці трубопроводу, значення якої на момент стрибка становила 15,8 °С. Після завершення перехідного процесу, приблизно 200 секунд, встановлене значення температури склало близько 56,3 °С.

Перехідна характеристика описується аперіодичною ланкою другого порядку. У загальному вигляді передатна функція такого об'єкта набуває вигляду:

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}$$

де: статичний коефіцієнт підсилення об'єкта; T_1 , T_2 – сталі часу, що відображають інерційність нагрівальних елементів та повітряного каналу ($T_1 > T_2$).

Оскільки експериментальні дані свідчать, що зміна температури починається майже миттєво після подачі керуючого впливу, транспортним запізненням можна знехтувати. Для визначення невідомих параметрів k , T_1 , T_2 застосовано оптимізаційний алгоритм Левенберга-Марквардта з мінімізацією відхилення між експериментальними та модельними значеннями температури. Цей метод реалізовано в модулі System Identification Toolbox пакету MatLab [2], процес ідентифікації детально описано, наприклад у [3]. В результаті знайдені наступні числові значення параметрів

передавальної функції об'єкта: коефіцієнт підсилення $k = 0,219 \text{ } ^\circ\text{C/V}$ (повна зміна температури складала $40,6^\circ\text{C}$ при зміні сигналу керування на 184 од.); основна стала часу $T_1 = 20,81 \text{ с}$; менша стала часу $T_2 = 5,55 \text{ с}$. Передавальна функція досліджуваного об'єкта набула вигляду:

$$W(p) = \frac{0,219}{(20,81p + 1)(5,55p + 1)}$$

Для перевірки адекватності синтезованої моделі розраховано показники точності. Середньоквадратична похибка складала близько 0.36°C , тобто теоретична крива відхиляється від експериментальних даних у середньому менш ніж на пів градуса, що є перевищує похибку датчика температури і пояснюється впливом навколишнього середовища. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.9989$, тобто математична модель пояснює 99.89 % дисперсії реальних даних, гарантуючи їй надзвичайно високу статистичну достовірність.

Проведена параметрична ідентифікація підтвердила, що динаміку електричного калорифера в системі вентиляції доцільно апроксимувати моделлю аперіодичної ланки другого порядку. Розраховані сталі часу $T_1 = 20,81 \text{ с}$ та $T_2 = 5,55 \text{ с}$ чітко відображають фізичну суть процесу – повільний прогрів трубчастих електричних нагрівачів та швидшу передачу тепла потоку повітря. Розраховані метрики засвідчують високу точність моделі. Отриману передавальну функцію можна успішно використовувати в подальшому для комп'ютерного моделювання системи автоматичного керування та розрахунку налаштувань регуляторів інженерними методами

Таким чином, у роботі проведено ідентифікацію математичної моделі теплових процесів у системі вентиляції. Запропоновано описати динаміку нагрівання повітря за допомогою передавальної функції аперіодичної ланки другого порядку. Застосовано метод Левенберга-Марквардта для знаходження оптимальних параметрів моделі та оцінено точність отриманої моделі за критеріями середньоквадратичної похибки та коефіцієнта детермінації. Знайдена модель показала високу адекватність і може бути використана для синтезу регулятора.

1. Лукінюк М. В. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: у 2 кн. Кн. 2. Керування хіміко-технологічними процесами [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом: «Хімічна технологія та інженерія» / М. В. Лукінюк. Київ: НТУУ «КПІ», 2012. 336 с.

2. System Identification Toolbox – MATLAB [Electronic resource] / MathWorks // Access URL: <https://uk.mathworks.com/products/sysid.html>

3. Коржик, М. В. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 174 с.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА ЦУКРОВОГО ПЕЧИВА

Курков В. В., Плашихін С. В.

КПШ ім. Ігоря Сікорського, v.kurckov@gmail.com

Автоматизація виробничих процесів – це комплекс заходів з розроблення нових, прогресивних технологічних процесів і створення на їх основі нових високопродуктивних машин і систем машин. Головний напрямок автоматизації – створення високопродуктивних технологічних процесів. Вона також забезпечує безпеку керованих процесів, вчасне попередження про відхилення від встановлених режимів роботи та захист навколишнього середовища від можливих негативних впливів*.

Актуальною є проблема зі створення інтегрованих виробничих систем. Для цього необхідне вирішення ряду важливих наукових та інженерних завдань створення технічних і програмних засобів керування, вимірювання, контролю за ходом виробництва, діагностики, маніпулювання оброблюваними деталями, конструювання інструменту, вибір технологічної стратегії.

Наведена на рисунку схема автоматизації включає основні контури контролю, регулювання та керування, які забезпечують узгоджену роботу обладнання.

Контур 1. Призначення контуру – збір інформації про рівень емульсії в змішувачі-емульгаторі та передача інформації оператору. До його складу входять: радарний рівнемір УЛМ-11 (поз. 1-1); індикатор технологічний мікропроцесорний ІТМ-11 (поз. 1-2).

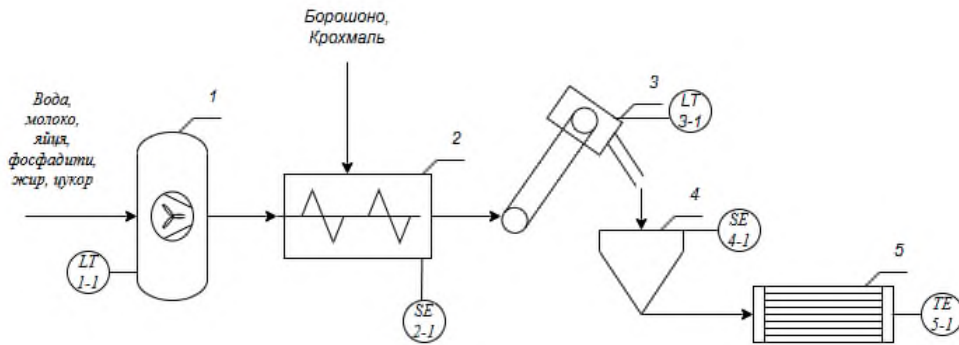
Контур 2. Призначення контуру – контроль кількості обертів в машині тістомісильній. До його складу входять: датчик частоти обертання ДТК-1 (поз. 2-1); тахометр електричний ТЕ-6К-ТК (поз. 2-2); індикатор технологічний мікропроцесорний ІТМ-11 (поз. 2-3).

Контур 3. Призначення контуру – збір інформації про рівень тіста в живильнику тіста та передача інформації оператору. До його складу входять: радарний рівнемір УЛМ-11 (поз. 3-1); індикатор технологічний мікропроцесорний ІТМ-11 (поз. 3-2).

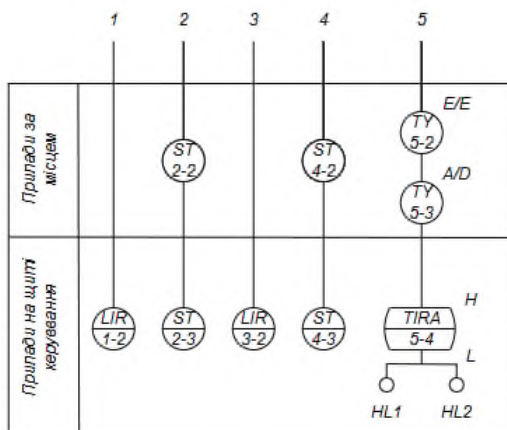
Контур 4. контроль кількості обертів в машині ротаційній формувальній. До його складу входять: датчик частоти обертання ДТК-1 (поз. 4-1); тахометр електричний ТЕ-6К-ТК (поз. 4-2); індикатор технологічний мікропроцесорний ІТМ-11 (поз. 4-3).

* Лукінюк М. В. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: у 2 кн. Кн.1. Методи та технічні засоби автоматичного контролю хіміко-технологічних процесів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготовки : «Хімічна технологія та інженерія» Київ : НТУУ «КПШ», 2012. 336 с. ISBN 978-966-622-530-9.

Контур 5. Призначення контуру – контроль та інформування оператора про температуру в печі. До його складу входять: термоперетворювач опору платиновий ТСП-1388 (поз. 5-1); перетворювач нормувальний П282 (поз. 5-2); аналого-цифровий перетворювач АЦП16 (поз. 5-3); індикатор технологічний мікропроцесорний ІТМ-11 (поз. 5-4); HL1, HL2 – лампи електричні сигнальні жовтого та червоного кольорів відповідно.



Позначення	Найменування
1	Змішувач-емульсатор
2	Машина тістомісильна
3	Живильник тіста
4	Машина ротаційна формувальна
5	Піч



Фрагмент схеми автоматизації процесу виробництва печива: 1 – змішувач-емульсатор; 2 – машина тістомісильна; 3 – живильник тіста; 4 – машина ротаційна формувальна; 5 – піч

В процесі реалізації зображеної на схемі система автоматизації виникає задача проектування щитової конструкції та розроблення математичної моделі процесу виробництва вина.

ВИКОРИСТАННЯ МАШИННОГО НАВЧАННЯ В СИСТЕМІ КОНТРОЛЮ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ БЕНЗЕНОМ

Гульчук А. А., Бугаєва Л. М.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, hulchuk.a.a.-lk51mn@edu.kpi.ua

У роботі представлено рішення задачі аналізу сенсорних даних системи контролю якості повітря із використанням методів машинного навчання, що набули широкого впровадження у багатьох областях [1, 2].

Метою дослідження є побудова прогнозуючої моделі для оцінювання концентрації бензену $C_6H_6(GT)$ де (GT) – *Ground Truth* (еталонне вимірне значення), на основі показників сенсорів та параметрів навколишнього середовища.

Для проведення дослідження використано відкритий технічний датасет *Air Quality* з репозиторію *UCI Machine Learning Repository*, який містить результати вимірювань сенсорів, концентрацій забруднювачів, а також параметрів мікроклімату. У процесі роботи було проаналізовано 9000 записів. У якості вхідних ознак було розглянуто такі параметри:

- $CO(GT)$ – концентрація чадного газу;
- $PT08.S1(CO)$ – показник сенсора, чутливого до CO ;
- $NOx(GT)$ – концентрація оксидів азоту;
- $PT08.S3(NOx)$ – показник сенсора, чутливого до NOx ;
- $NO_2(GT)$ – концентрація діоксиду азоту;
- $PT08.S4(NO_2)$ – показник сенсора, чутливого до NO_2 ;
- $PT08.S5(O_3)$ – показник сенсора, чутливого до озону;
- T – температура повітря;
- RH – відносна вологість;
- AH – абсолютна вологість.

Цільовою змінною моделі було обрано концентрацію бензену $C_6H_6(GT)$ в повітрі. Оскільки необхідно передбачити числове значення, поставлена задача належить до класу задач регресії. Для реалізації дослідження було розроблено програмне забезпечення у середовищі *Python* з використанням бібліотек *pandas*, *matplotlib* та *scikit-learn* (фрагмент коду наведено на рисунку).

На основі попереднього аналізу даних було визначено, що середнє значення концентрації бензену становить $10,08 \text{ мкг/м}^3$, стандартне відхилення – $7,45 \text{ мкг/м}^3$, а діапазон зміни значень лежить у межах від 0,1 до $63,7 \text{ мкг/м}^3$. Це свідчить про достатню варіативність даних та доцільність застосування методів машинного навчання для прогнозування. Додатково було проведено аналіз впливу часу доби на рівень забруднення бензеном. Аналіз показав, що найменші концентрації бензену спостерігаються вночі та рано вранці, а найбільші – у вечірні години, особливо в інтервалі 18:00 – 20:00. Отже, ознака часу є інформативною для задачі прогнозування.

```

165 # 18) РОЗДІЛЕННЯ НА TRAIN I TEST
166 X_train, X_test, Y_train, Y_test = train_test_split(
167     X, y, test_size=0.2, random_state=42, shuffle=True
168 )
169
170 print("18")
171 print("X_train shape:", X_train.shape)
172 print("X_test shape:", X_test.shape)
173 print("Y_train shape:", Y_train.shape)
174 print("Y_test shape:", Y_test.shape)
175
176
177 # 19) СТВОРЮЄМО МОДЕЛЬ ВИПАДКОВОГО ЛІСУ
178 model = RandomForestRegressor(
179     n_estimators=200,
180     random_state=42
181 )
182
183 # 20) Навчаємо модель
184 model.fit(X_train, Y_train)
185

```

Фрагмент основного коду моделі

Для побудови прогнозуючої моделі обрано алгоритм *Random Forest Regressor* (випадковий ліс для задач регресії), який добре працює з багатовимірними даними, є стійким до шуму та дозволяє виявляти складні нелінійні залежності між сенсорними показниками та цільовою змінною.

Для навчання моделі використовувалась функція *fit()*, яка автоматизує процес шляхом багаторазового проходження по навчальній вибірці, обчислення похибки та оновлення параметрів моделі для підвищення точності прогнозування, а оцінка якості моделі – за допомогою коефіцієнта детермінації R^2 та середньої абсолютної помилки *MAE*. Отримані значення цих показників $R^2 = 0,96$ та $MAE = 0,74$ свідчать про високу точність моделі прогнозування.

Для перевірки практичної придатності моделі було сформовано серію тестових прикладів, що імітують показники реальної сенсорної системи. На основі цього набору вхідних даних модель за допомогою функції *predict()* визначала прогнозовані значення концентрації бензену. Як показали розрахунки, побудована модель з високою точністю відтворює реальні значення концентрації бензену і на тестових даних.

У результаті дослідження із використанням методів машинного навчання була побудована високоточна модель для прогнозування концентрації бензену за показниками сенсорів, температури, вологості та часових характеристик. Застосування алгоритму *Random Forest Regressor* забезпечило високу якість моделювання. Подібний підхід може бути застосований для прогнозування забруднення повітря в регіонах України за умови наявності відповідних даних.

1. Bugaieva L., Shahan D., Beznosyk Y. Selection of catalysts for the process of oxidative condensation of methane using the intelligent decision support system. *Technology Audit and Production Reserves*, 2019, 1(3(51)), 4-10. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.198335>

2. Ярошук Л. Д., Тюріна Є. О., Путятін Р. О. Системи штучного інтелекту. Методи штучного інтелекту. Комп'ютерний практикум : навч. посіб. для студ. спец. 174 „Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка”. 2-ге вид., перероб. і доп. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 108 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/73920>

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕНЗОРНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ КІБЕРЗАГРОЗ У ПРОМИСЛОВИХ SCADA-МЕРЕЖАХ

Дорогий Я. Ю.¹, Цуркан В. В.²

¹Донецький національний технічний університет, yaroslav.dorohyi@donntu.edu.ua

²КПІ ім. Ігоря Сікорського

Сучасні SCADA-системи є критично важливими компонентами промислової інфраструктури, що забезпечують моніторинг і керування технологічними процесами. Інтеграція таких систем з корпоративними мережами та Інтернетом підвищує їхню вразливість до кіберзагроз, серед яких особливу небезпеку становлять цілеспрямовані атаки, включаючи АРТ, атаки типу відмови в обслуговуванні та підміну даних. У зв'язку з цим актуальним є застосування інтелектуальних методів аналізу даних, здатних враховувати складну структуру SCADA-сервовищ.

Традиційні підходи до аналізу даних, що базуються на векторних і матричних моделях, мають обмежену здатність до обробки багатовимірних залежностей. Натомість тензорні моделі дозволяють природно представити багатовимірні дані. Нехай дані SCADA-системи представлені у вигляді тензора:

$$\mathcal{X} \in \mathbb{R}^{I \times J \times K},$$

де I – кількість сенсорів, J – часові відліки, K – типи параметрів. Така модель дозволяє одночасно враховувати часові, просторові та функціональні залежності, що є критично важливим для аналізу кіберінцидентів [1, 2].

Для виділення прихованих закономірностей застосовується *CANDECOMP/PARAFAC* декомпозиція:

$$\mathcal{X} \approx \sum_{r=1}^R a_r \circ b_r \circ c_r$$

де R – ранг розкладу, а a_r, b_r, c_r – факторні вектори. Це дозволяє ідентифікувати латентні патерни нормальної роботи системи.

Альтернативно використовується декомпозиція Такера:

$$\mathcal{X} \approx \mathcal{G} \times_1 A \times_2 B \times_3 C$$

де \mathcal{G} – ядровий тензор, A, B, C – факторні матриці, \times_n – n -модовий добуток.

Для виявлення аномалій формується залишковий тензор:

$$\mathcal{E} = \mathcal{X} - \hat{\mathcal{X}}$$

де $\hat{\mathcal{X}}$ – реконструйовані дані. Критерієм аномальності виступає фробеніусова норма:

$$|\mathcal{E}|_F = \sqrt{\sum_{i,j,k} e_{ijk}^2}.$$

Аномалія фіксується за умовою:

$$|\mathcal{E}|_F > \theta,$$

де θ – порогове значення.

Для підвищення точності аналізу запропоновано використання великих мовних моделей (*LLM*) як класифікатора кіберінцидентів. *LLM* дозволяють інтегрувати числові ознаки, отримані з тензорної декомпозиції, з текстовими описами подій (логи, повідомлення системи), формуючи узагальнене представлення стану системи. Формально задача класифікації може бути представлена як:

$$y = f_{LLM}(Z, T)$$

де Z – множина тензорних ознак, T – текстові дані, y – клас кіберінциденту. Використання *LLM* дозволяє враховувати контекст подій, що значно підвищує точність виявлення складних атак [3].

Запропонований підхід дозволяє виявляти як відомі, так і нові типи атак, зокрема багатокрокові сценарії, що проявляються через зміну структури взаємозв'язків у даних. Інтеграція тензорних моделей із *LLM* відкриває нові можливості для побудови адаптивних систем кіберзахисту.

Отже, використання тензорного аналізу у поєднанні з великими мовними моделями є перспективним напрямом підвищення ефективності виявлення кіберзагроз у SCADA-мережах та забезпечення безпеки критичної інфраструктури.

1. Kolda T. G., Bader B. W. Tensor decompositions and applications. *SIAM Review*. 2009. Vol. 51, № 3. P. 455–500. DOI: 10.1137/07070111X.

2. Дорогий Я.Ю., Цуркан В.В. Тензорний аналіз для задач кібербезпеки та пошуку аномалій в критичній інфраструктурі на базі технологій ШІ / Я.Ю. Дорогий, В.В. Цуркан // Актуальні питання, проблеми та перспективи розвитку науки і освіти: матеріали II міжн. наук.-практ. конф., Полтава, 24-26 квітня 2025 р. / ДНУ “Інститут модернізації освіти”. Полтава: ДНУ ІМО, 2025. С. 463–466.

3. Brown T. B. et al. Language models are few-shot learners. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2020. Vol. 33. P. 1877–1901. DOI: 10.48550/arXiv.2005.14165

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИНА

Бех В. В., Плашихін С. В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, bekh.victoria@lil.kpi.ua

Автоматизація виноробного виробництва базується на впровадженні систем безперервного моніторингу та регулювання ключових технологічних параметрів: температури, рівнів. Застосування автоматизованих систем керування забезпечує стабільність протікання процесів, гарантує повторюваність якісних характеристик продукту та оптимізує виробничі витрати.

Наведена на рисунку схема автоматизації включає основні контури контролю, регулювання та керування, які забезпечують узгоджену роботу обладнання .

Контур 1. Призначення контуру – забезпечує контроль витрати молодого вина, що надходить до резервуара, для доброджування 9 та включає перетворювач витрати електромагнітний (поз. 1-1); індикатор технологічний мікропроцесорний (поз. 1-2).

Контур 2. Призначення контуру - забезпечує контроль витрати молодого вина, що надходить до резервуара для доброджування 9 та включає перетворювач витрати електромагнітний(2-1); індикатор технологічний мікропроцесорний (поз. 2-2).

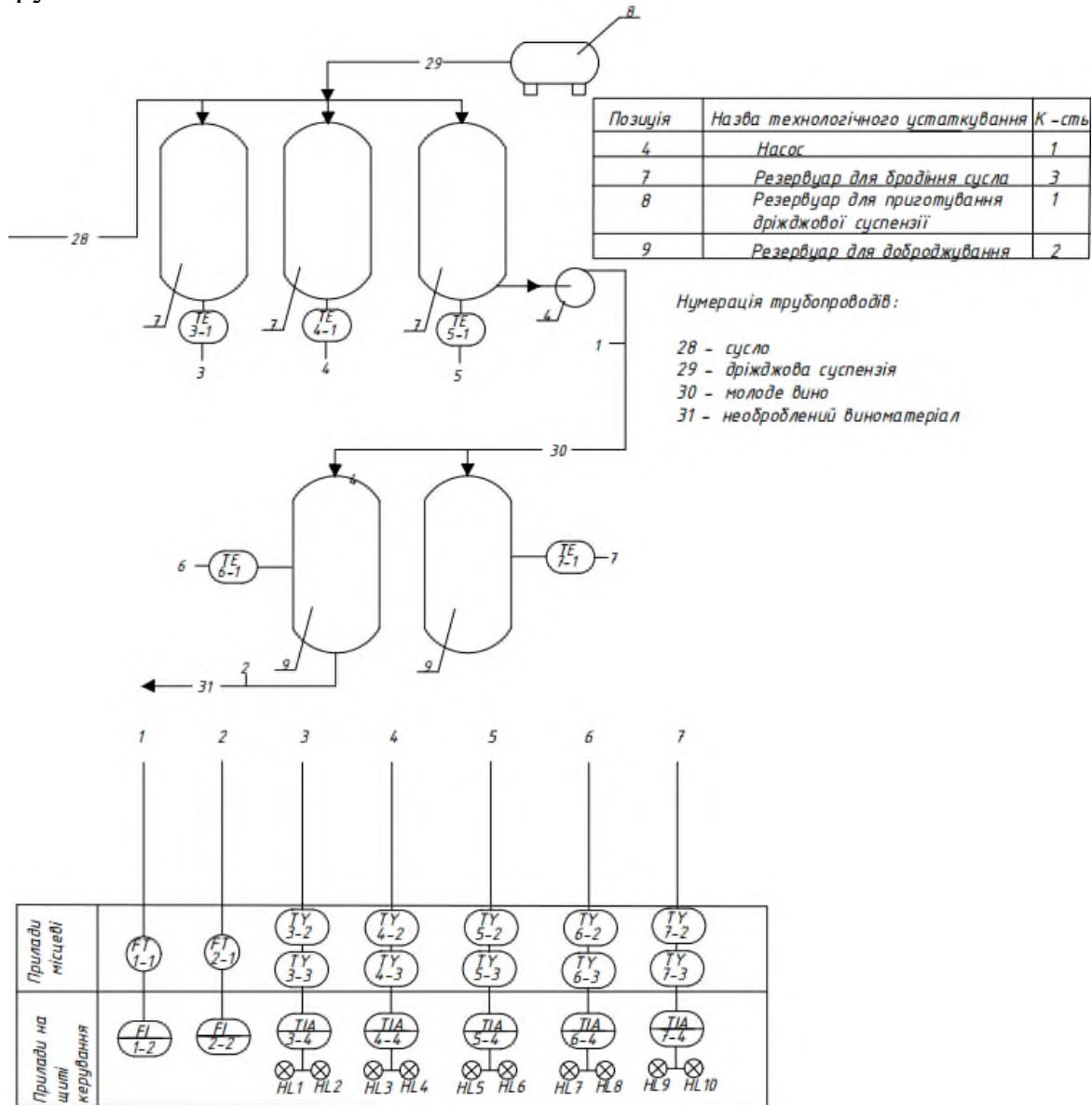
Контур 3. Призначення контуру – забезпечує контроль та сигналізацію температури сусла у резервуара для бродіння сусла 7 та включає термоелектричний перетворювач (поз. 3-1); перетворювач нормувальний (3-2); перетворювач електропневматичний (поз. 3-3); прилад вторинний пневматичний показувальний, з пристроєм сигналізації (поз. 3-4); HL1, HL2-лампи електричні сигнальні жовтого кольору.

Контур 4. Призначення контуру – забезпечує контроль та сигналізацію температури сусла у резервуара для бродіння сусла 7 та включає термоелектричний перетворювач (поз. 4-1); перетворювач нормувальний (4-2); перетворювач електропневматичний (поз. 4-3); прилад вторинний пневматичний показувальний, з пристроєм сигналізації (поз. 4-4); HL3, HL4-лампи електричні сигнальні жовтого кольору.

Контур 5. Призначення контуру – забезпечує контроль та сигналізацію температури сусла у резервуара для бродіння сусла 7 та включає термоелектричний перетворювач (поз. 5-1); перетворювач нормувальний (поз. 5-2); перетворювач електропневматичний (поз. 5-3); прилад вторинний пневматичний показувальний, з пристроєм сигналізації (поз. 5-4); HL5, HL6-лампи електричні сигнальні жовтого кольору.

Контур 6. Призначення контуру – забезпечує контроль та сигналізацію температури молодого вина в резервуарі для доброджування 9 та включає термоелектричний перетворювач (поз. 6-1); перетворювач нормувальний (поз. 6-2); перетворювач електропневматичний (поз. 6-3); прилад вторинний пневматичний показувальний, з пристроєм сигналізації (поз. 6-4); HL7, HL8-лампи електричні сигнальні жовтого кольору.

Контур 7. Призначення контуру – забезпечує контроль та сигналізацію температури молодого вина в резервуарі для доброджування 9 та включає термоелектричний перетворювач (поз. 7-1); перетворювач нормувальний (поз. 7-2); перетворювач електропневматичний (7-3); прилад вторинний пневматичний показувальний, з пристроєм сигналізації (поз. 7-4); HL9, HL10-лампи електричні сигнальні жовтого кольору.



Фрагмент схеми автоматизації процесу виготовлення вина: 4 – насос; 7 – резервуар для бродіння сусла; 8 – резервуар для приготування дріжджової суспензії; 9 – резервуар для доброджування

В процесі реалізації зображеної на схемі система автоматизації виникає задача проектування щитової конструкції та розроблення математичної моделі процесу виробництва вина.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ НАГРІВАННЯ У ПЛАВИЛЬНИКУ КАПРОЛАКТАМУ

Гаврилюк О. О., Ситніков О. В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, havryliuk.o.o.-la21@edu.kpi.ua

Для забезпечення високої якості продукції в хімічній промисловості необхідна автоматизація процесів, що базується на використанні адекватних математичних моделей об'єктів керування. Одним із таких об'єктів є плавильник капролактаму, де відбувається нагрівання сировини під дією пари.

Названий процес характеризується інерційністю, що обумовлена накопиченням та розсіюванням теплової енергії. У системі автоматичного керування (САК) як вхідний сигнал x розглядається подача теплоти за рахунок пари (Q), а як вихідний сигнал y – температура розплавленого мономеру (h).

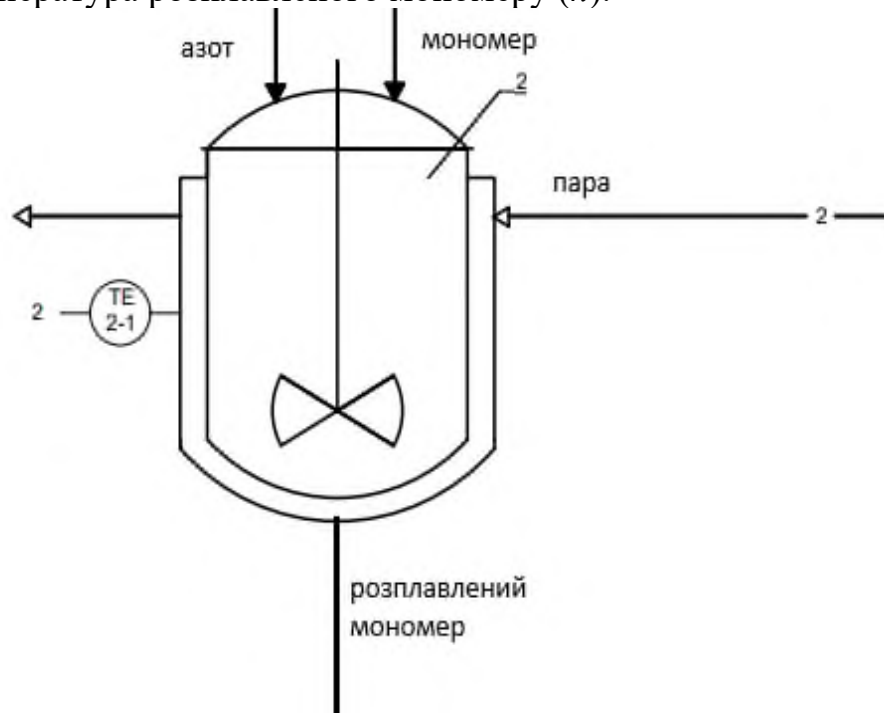


Рис. 1. Схема плавильника капролактаму

Об'єкт дослідження можна описати за допомогою аперіодичної ланки першого порядку. Математичний опис у формі передавальної функції (згідно з вимогами аукової термінології) має вигляд:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}$$

де K – коефіцієнт передачі, що визначається потужністю нагрівача; T – часова константа, яка залежить від об'єму плавильника та характеристик теплообміну; τ – час чистого запізнення (у секундах).

Для аналізу динамічних властивостей об'єкта було проведено моделювання в середовищі Mathcad із параметрами $K = 2$, $T = 30$ с, $\tau = 10$ с. Отримана перехідна характеристика відображає поступове досягнення нового сталого значення температури після ступінчастої зміни подачі пари.

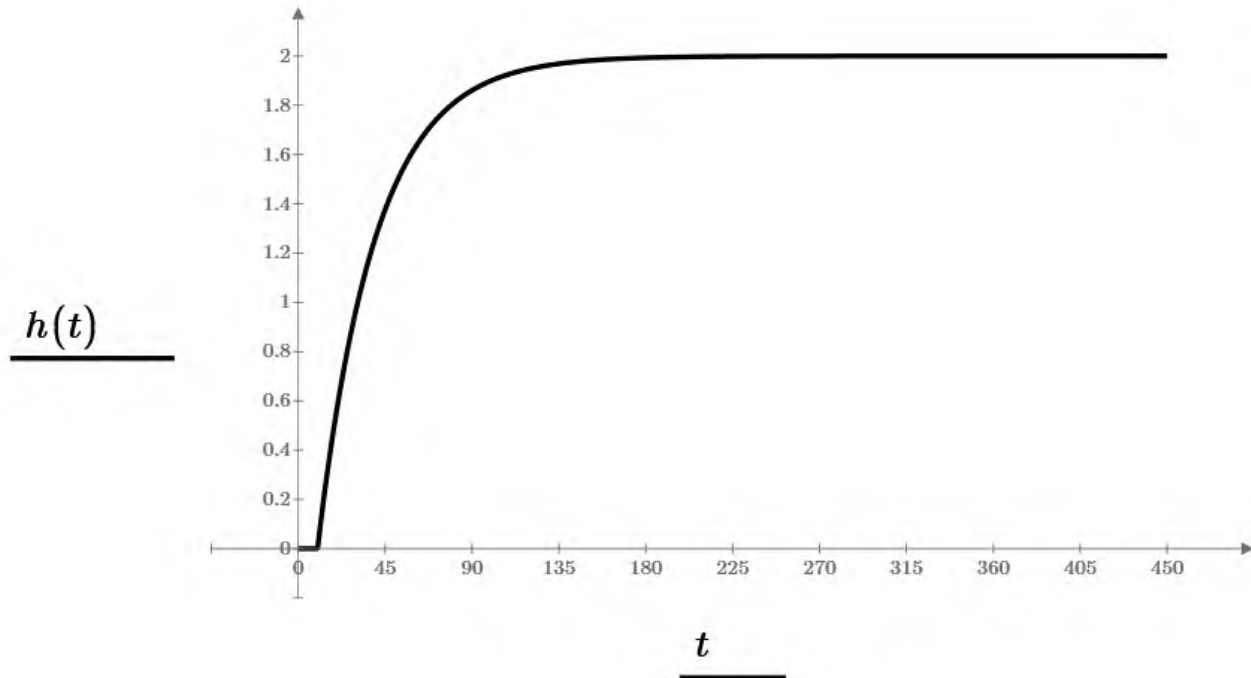


Рис. 2. Графік перехідної характеристики

Результати моделювання підтвердили, що температура розплаву змінюється із затримкою, що відповідає тепловій інерційності об'єкта. Такий підхід дозволяє спростити опис процесу та використати його для побудови систем автоматичного регулювання температури.

1. Бабіченко А. К. Промислові засоби автоматизації: навч. посіб. : У 2 ч. Харків : НТУ «ХПІ», 2003. Ч. 1. Вимірвальні пристрої. 470 с. ISBN 966-593-232-2.

2. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології. Київ : НТУУ «КПІ», 2008. 236 с. ISBN 978-966-622-287-2.

РОБАСТНІ AI-МОДЕЛІ ДЛЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Дорогий Я. Ю.¹, Цуркан В. В.²

¹Донецький національний технічний університет, yaroslav.dorohyi@donntu.edu.ua,

²КПІ ім. Ігоря Сікорського

Сучасні технологічні процеси функціонують в умовах значної невизначеності, яка обумовлена шумами вимірювань, неповнотою даних, змінністю параметрів середовища, а також впливом зовнішніх факторів, включаючи людський фактор і кіберзагрози. У складних виробничих системах навіть незначні відхилення можуть призводити до суттєвих втрат ефективності або аварійних ситуацій. Це зумовлює необхідність використання робастних моделей штучного інтелекту, здатних забезпечувати стабільність і надійність прийняття рішень навіть за умов невизначеності та неповної інформації [1].

Нехай технологічний процес описується у вигляді вхідного вектора ознак

$$x \in R^n$$

та функції прийняття рішень:

$$y = f(x, \theta)$$

де θ – параметри моделі. У реальних умовах спостережувані дані зазнають збурень:

$$x = x_0 + \delta, \quad |\delta| \leq \epsilon$$

де δ – вектор невизначеності або шуму, а ϵ визначає допустимий рівень відхилення. У такому випадку класичні методи оптимізації можуть давати нестабільні результати, що потребує переходу до робастних постановок задачі.

Завдання робастного навчання формалізується як мінімізація втрат у найгіршому випадку:

$$\min_{\theta} \max_{|\delta| \leq \epsilon} L(f(x + \delta, \theta), y)$$

де L – функція втрат. Такий підхід дозволяє моделі бути стійкою до варіацій вхідних даних і забезпечує більш надійну роботу в реальних умовах експлуатації.

Для підвищення узагальнюючої здатності моделей широко застосовується регуляризація:

$$\min_{\theta} (L(f(x, \theta), y) + \lambda |\theta|^2)$$

де λ – коефіцієнт регуляризації, що контролює баланс між точністю моделі та її складністю. Це дозволяє зменшити перенавчання та підвищити стійкість до шумових впливів.

Ефективним підходом до підвищення робастності є використання ансамблевих методів, які об'єднують результати декількох моделей:

$$y = \sum_{i=1}^M w_i f_i(x)$$

де $f_i(x)$ – окремі моделі, а w_i – вагові коефіцієнти. Така стратегія дозволяє зменшити дисперсію прогнозів і підвищити надійність прийняття рішень у складних

умовах [2]. Крім того, ансамблеві підходи добре працюють у випадках, коли дані є неоднорідними або містять пропуски.

Окрему увагу слід приділити використанню великих мовних моделей як інтелектуальних компонентів систем підтримки прийняття рішень. Вони здатні інтегрувати структуровані дані (сенсорні вимірювання) та неструктуровану інформацію (текстові логи, звіти операторів, події системи), формуючи комплексне уявлення про стан технологічного процесу:

$$y = f_{LLM}(x, T)$$

де T – текстові дані.

Використання *LLM* дозволяє враховувати контекст подій, виявляти приховані залежності та інтерпретувати складні ситуації, що особливо важливо для управління критичною інфраструктурою [3].

Додатково, для роботи в умовах високої невизначеності можуть застосовуватися методи нечіткої логіки та байєсівські підходи, які дозволяють формалізувати невизначеність і працювати з ймовірнісними оцінками. Інтеграція таких методів з AI-моделями створює гібридні системи, здатні більш ефективно адаптуватися до змін середовища.

Отже, поєднання робастної оптимізації, регуляризації, ансамблевих методів та великих мовних моделей дозволяє створювати ефективні системи прийняття рішень для технологічних процесів. Такі системи характеризуються високою стійкістю до шумів, адаптивністю та здатністю працювати в умовах невизначеності. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку адаптивних алгоритмів, здатних працювати в режимі реального часу, а також на інтеграцію запропонованих підходів у промислові системи автоматизації.

1. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016.
2. Zhou Z.-H. Ensemble Methods: Foundations and Algorithms. CRC Press, 2012. DOI: 10.1201/b12207.
3. Brown T. B. et al. Language models are few-shot learners. Advances in Neural Information Processing Systems. 2020. Vol. 33. DOI: 10.48550/arXiv.2005.14165.

СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ВИРОБНИЦТВІ ФОСФОРНОЇ КИСЛОТИ

Савченко Т. В., Ярощук Л. Д.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, tanjasavch@gmail.com

Виробництво термічної фосфорної кислоти характеризується складністю керування через інтенсивне тепловиділення, агресивність середовищ та нестаціонарність обладнання. Такі умови зумовлюють низьку адекватність аналітичних моделей та неспроможність традиційних алгоритмів керування врахувати причинно-наслідкові зв'язки технологічних порушень. Це визначає необхідність впровадження інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (ІСППР), яка поєднала б традиційні обчислювальні методи теорії керування з аналітичним досвідом експертів для розв'язання завдань діагностування з високим рівнем невизначеності та прогнозування станів системи.

Метою дослідження є підвищення ресурсоефективності та екологічності виробництва термічної фосфорної кислоти шляхом застосування інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень.

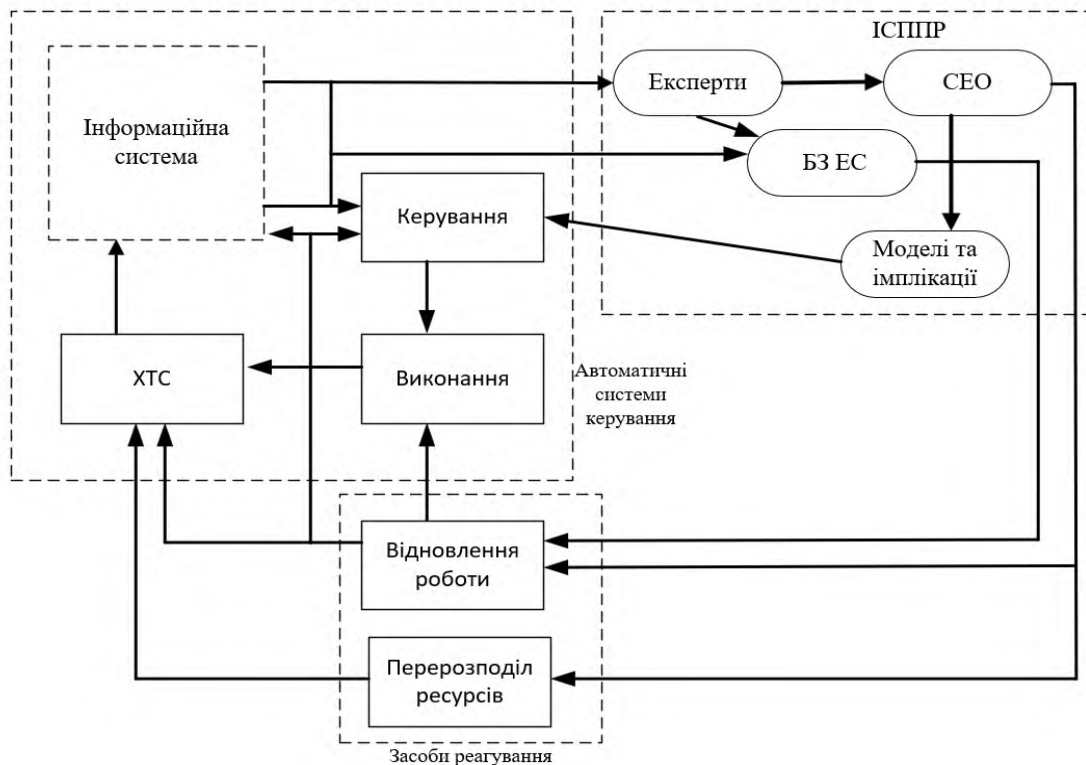
Запропонована структура ІСППР інтегрована в ієрархію керування виробництвом фосфорної кислоти і функціонує на *MES*-рівні, забезпечуючи координацію між локальними системами автоматичного керування (САК) та поставленими цілями ресурсоефективності та екологічності [1]. Джерелами інформації на виробничому рівні є традиційні технічні засоби автоматизації для вимірювання температури, витрати, концентрації тощо та інтелектуальні сенсори на основі комп'ютерного зору для відслідковування стану робочих поверхонь. Інтелектуальним ядром системи є підсистема управління знаннями, яка складається з розроблених експертної системи (ЕС) і модуля експертного оцінювання (СЕО, системи ранжування). Робота ІСППР починається з модуля СЕО, який на основі накопичених знань визначає об'єкт керування (ОК), пріоритетний з точки зору зниження рівня ресурсозбереження та екологічної безпеки. ЕС реалізує механізм логічного висновку на основі бази знань, представленої у вигляді дерева аварійних ситуацій (ДАС), що дозволяє формалізувати ідентифікацію першопричини технологічних відхилень [2].

Підсистема управління моделями забезпечує генерацію керувальних рішень через нечітку систему автоматичного керування (НчСАК), яка на основі лінгвістичних правил формалізує досвід експертів для оптимізації параметрів локальних регуляторів. Це дозволяє формувати режимні рекомендації із корекцією нечітких моделей та імплікацій через спеціалізовану СЕО.

Функціональний цикл інтелектуальної системи завершується формуванням конкретних рекомендацій щодо стабілізації показників якості готової продукції відповідно до регламентованих вимог.

На рисунку представлено узагальнену схему взаємодії ІСППР з локальними САК для управління процесами виробництва термічної фосфорної кислоти. Запропонована авторами архітектура системи включає такі функціональні

складові: *інформаційна система* – забезпечує збирання, збереження та обробку інформації від технічних засобів автоматизації та лабораторних вимірювань за допомогою єдиної бази даних; *система експертного оцінювання* – реалізує отримання знань від експертних груп для різних поточних нетривіальних задач керування; *база знань експертної системи (БЗ ЕС)* – містить перелік порушень та дозволяє за допомогою ДАС логічно обґрунтувати першопричину появи будь-якого порушення; *блок моделювання та імплікації* – забезпечує формалізацію нечітких знань експертів для адаптації сценаріїв керування.



Узагальнена схема взаємодії ІСПП з локальними САК для управління процесами виробництва термічної фосфорної кислоти

Запропонована інтелектуальна підтримка інтеграції локальних технологічних параметрів з критеріями ресурсоефективності та екологічності дозволяє підвищити економічну ефективність виробництва в цілому. У результаті впровадження ІСПП виробництво фосфорної кислоти перетворюється на сучасну комп'ютерно-інтегровану технологічну систему, здатну вчасно та ситуативно реагувати на зовнішні та внутрішні збурення.

Результати роботи можуть бути використані у розробці адаптивних систем керування та цифрових моделей прогнозування ризиків.

1. Нестеренко О. В., Савенков О. І., Фаловський О. О. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень: Навч. посібн. / За ред. П. І. Бідюка. Київ : Національна академія управління, 2016. 188 с.

2. Експертні методи в автоматизованих системах керування : Формування та напрями використання експертних знань : [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Л. Д. Ярощук. – 2-ге вид., допов. – Електронні текстові дані. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 43 с.

СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ В ПРОТОЧНОМУ РЕАКТОРІ

Грицаєнко І. О., Ситніков О. В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, grytsaenko.ivan@iit.kpi.ua

Керування температурними режимами в проточному реакторі є критично важливою задачею, оскільки відхилення від заданої температури безпосередньо впливає на швидкість хімічної реакції та якість кінцевого продукту. Проте побудова точної математичної моделі такого об'єкта ускладнюється зміною фізичних властивостей середовища та параметрів навколишнього середовища. Наразі адекватний опис реальних об'єктів потребує включення до математичних моделей невизначених параметрів, що змінюються в певних діапазонах. Математичну модель каналу керування температурою представлено у вигляді передавальної функції першого порядку із запізненням:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-s\tau}$$

де K – коефіцієнт підсилення; T – стала часу; τ – час запізнення.

Теоретичною базою для синтезу регулятора обрано принцип робастності, що забезпечує стійкість системи за умов варіації параметрів T та τ . Ідея полягає у представленні невизначеного об'єкта через ймовірнісну зміну його параметрів та подальше усереднення ансамблю синтезованих оптимальних регуляторів для отримання єдиного робастного закону керування. У разі дискретного розподілу ймовірності середнє значення обчислюється як сума добутків кожного значення випадкової величини на її ймовірність.

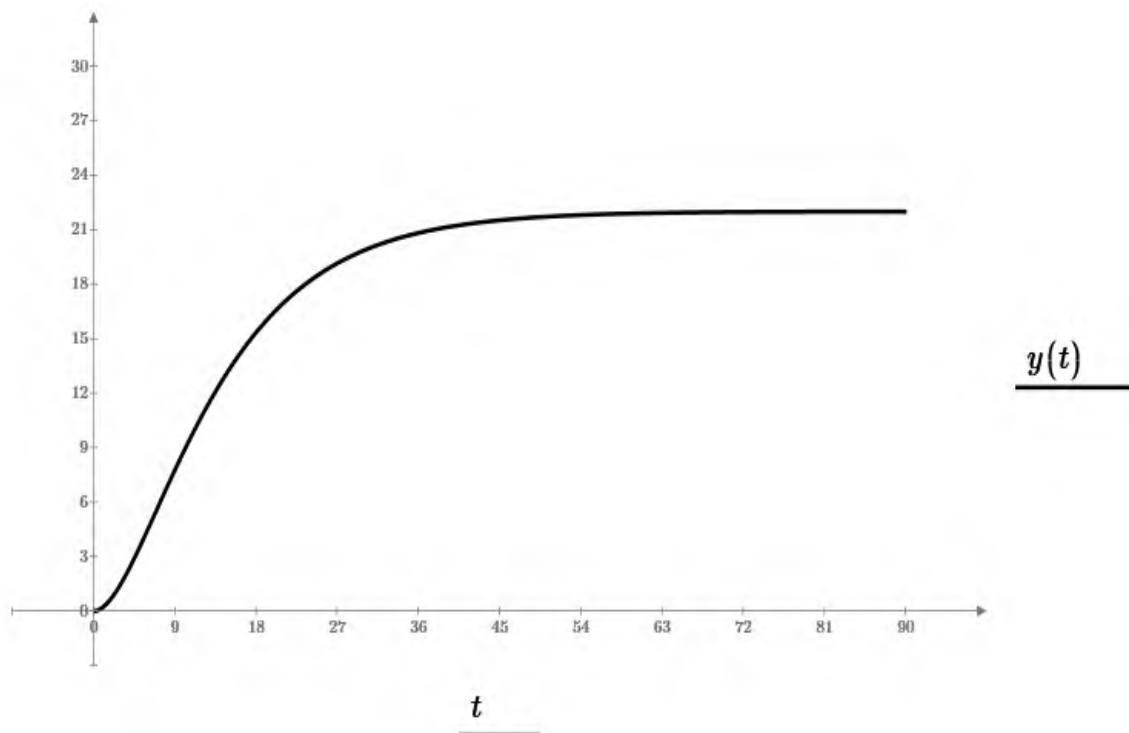
Для забезпечення заданих показників якості (мінімального часу регулювання та перерегулювання не більше 15 %) проведено синтез ПІД-регулятора. Розрахунок параметрів налаштування виконано на основі критеріїв оптимальності для ансамблю можливих станів об'єкта. Отримані значення параметрів наведено у таблиці.

Параметри налаштування ПІД-регулятора

Варіант налаштування	K_p	T_i	T_d	Оцінка якості
Розрахунковий	2,45	45	11,2	0,945
Робастний	1,85	52	10,5	0,872

Для всіх випадкових об'єктів регулятор забезпечує вихід на усталений рівень. Присутнє також перерегулювання, обумовлене алгоритмом налаштування. Перехідні характеристики підтверджують стійкість системи в усьому діапазоні невизначеності.

На рисунку зображено перехідну характеристику системи при стрибкоподібній зміні завдання температури. Перехідний процес має згасальний характер, що свідчить про стійкість системи.



Перехідна характеристика контуру регулювання температури

Застосування принципу усереднення (аналог методу Dropout у нейронних мережах) дає змогу уникнути «перенавчання» регулятора на конкретну модель і забезпечує його стабільну роботу в усьому діапазоні невизначеності об'єкта. Перехідні характеристики, отримані в результаті моделювання, підтверджують, що система забезпечує вихід на ustalений рівень із допустимим перерегулюванням.

За результатами аналізу перехідних характеристик можна зробити висновок, що розроблений регулятор дає змогу ефективно компенсувати зовнішні збурення та підтримувати температуру на ustalеному рівні. Використання запропонованого підходу до синтезу забезпечує стабільність роботи системи за умов варіації параметрів об'єкта.

1. Лукінюк М. В. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами [у 2 кн.]. Кн. 1. Методи та технічні засоби автоматичного контролю хіміко-технологічних процесів [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки «Хімічна технологія та інженерія» / М. В. Лукінюк ; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, НТУУ «КПІ». Електронні текстові дані (1 файл: 4,46 Мбайт). Київ : Політехніка, 2012. 336 с.

2. Бабіченко А. К. Промислові засоби автоматизації: навч. посіб. : У 2 ч. Харків : НТУ «ХПІ», 2003. Ч. 1. Вимірвальні пристрої. 470 с. ISBN 966-593-232-2.

ПЕРЕЛІК ВХІДНИХ ТА ВИХІДНИХ СИГНАЛІВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ЙОГО СТАНДАРТИЗАЦІЯ

Мухін І. В., Лукінюк М. В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, zyzaigor5@gmail.com

Перелік вхідних та вихідних сигналів або, як його ще називають, *Input/Output List* або *I/O List* є фундаментальним документом, який використовується для проектування систем автоматизації. Він містить інформацію про сигнали, які надходять і передаються на польові пристрої, зокрема фізичний тип сигналу, діапазон вимірювання та інше. Цей документ, якщо його якісно та правильно підготувати, дає змогу зменшити можливість виникнення помилок під час монтажу кабельних мереж та прискорює етап пусконаладжувальних робіт, що надає інженерам переваги у взаємодії між фізичним обладнанням і системою керування [1].

Одна із основних ідей переліку сигналів полягає в тому, що він систематизує всю інформацію про технологічний процес і засоби автоматизації в одному документі. Завдяки йому інженери працюють із єдиною узгодженою інформаційною базою. Це дозволяє уникати розбіжностей між проектними рішеннями та їх реалізацією. *I/O List* містить чітку інформацію про типи сигналів (аналогові, дискретні), їх параметри (4...20 мА, 0...10 В тощо) та джерела, дозволяє правильно підібрати кабелі, модулі введення-виведення та інше обладнання, а також мінімізувати помилки під час підключення. Перелік сигналів є основою для розроблення програмного забезпечення. Саме на його базі створюються змінні у ПЛК, налаштовуються теги в *SCADA*, задаються алгоритми керування, межі тривоги та уставки. Без цього документа неможливо забезпечити коректну роботу системи керування. Крім того, цей документ є вихідною точкою для створення інших проектних матеріалів, зокрема таблиць підключення контролера, схем клемних з'єднань, кабельних журналів та іншої документації для обслуговування системи [2].

Перелік вхідних і вихідних сигналів важливий ще й під час подальшої роботи з системою. Його використовують під час обслуговування, ремонту або модернізації, оскільки він дозволяє швидко зрозуміти, звідки приходить сигнал, які він має параметри і з яким обладнанням пов'язаний. Особливо це корисно для складних систем, де без такого документа важко швидко знайти причину помилки або несправностей. Таким чином, *I/O List* є ключовим документом, який забезпечує узгодженість усіх етапів створення системи автоматизації – від проектування до експлуатації.

Незважаючи на свою критичну роль, перелік вхідних і вихідних сигналів не має жорстко визначеної структури, яка визначалася б національними або міжнародними стандартами. Існує декілька підходів до складання переліку вхідних та вихідних сигналів. Найпоширенішим [3], особливо для невеликих та середніх проектів,

є підхід до складання переліку за типом сигналу. У такому документі кожен тип сигналу – аналоговий вхідний, аналоговий вихідний, дискретний вхідний та дискретний вихідний – розділяються окремо. У такому разі легко підрахувати загальну кількість модулів кожного типу та закласти необхідний резерв. Тож основними пунктами переліку будуть ідентифікатор приладу, напруга/струм, тип підключення та технічні межі вимірюваної величини. Іншим підходом до складання переліку буде підхід за технологічними зонами. У цьому варіанті сигнали групуються не за типом, а за місцем розташування обладнання. На основі складеного за таким принципом переліку зручно проводити ремонти та випробування. Основними пунктами переліку у такому варіанті будуть назва зони/цеху, номер проміжної клемної коробки, номер кабелю/проводу та посилання на схему, де зображено технічний засіб, який є джерелом або приймачем сигналу. Третім підходом буде матрична або програмна структура переліку. Це максимально деталізована таблиця, де зібрана вся інформація: від фізичної клеми до адреси в пам'яті контролера та налаштувань SCADA-системи. Окрім стандартних пунктів, у таку форму переліку додається абсолютна адреса та формула масштабування сигналу, межі спрацювання тривоги та посилання на архів значень сигналу.

Відсутність чіткої стандартизації *I/O List* пояснюється рядом причин [2]. По-перше, системи автоматизації відрізняються надзвичайною різноманітністю. Вони застосовуються у різних галузях, мають різні масштаби та рівень складності. Універсальний формат, який однаково добре підходив би для всіх випадків, створити практично неможливо. По-друге, різні виробники обладнання мають власні підходи до організації даних і тегів. Це впливає на структуру *I/O List*, зокрема на назви полів, формат запису сигналів та спосіб їх ідентифікації. По-третє, кожен проєкт має свої специфічні вимоги. Наприклад, у складних системах можуть додаватися додаткові поля – такі як пріоритет тривоги, протоколи зв'язку та інше, тоді як у простіших проєктах використовується мінімальний набір пунктів.

Таким чином, відсутність стандартизації не є вадю як такою, а радше гнучкістю, яка дозволяє адаптувати документ під конкретні умови проєкту. Головною вимогою залишається не форма, а повнота, точність і зручність використання інформації.

1. *I/O List – Complete Definition & Guide (2025)* [Electronic resource] / PLC programming IO // Access URL: <https://plcprogramming.io/glossary/i-o-list>.

2. IO List / IACS Engineering. Specialized Professionals Network // Access URL: <https://www.iacsengineering.com/io-list/>.

3. Understanding the I/O List in Industrial Automation [Electronic resource] / Raman Deep at LinkedIn // Access URL: https://www.linkedin.com/posts/raman-deep-194b81216_understanding-the-io-list-in-industrial-share-7311467269115506690-m4Ux/.

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В КОНЦЕПЦІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

Аршанський Д. І., Степанець О. В.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, d.arshanskiy@gmail.com

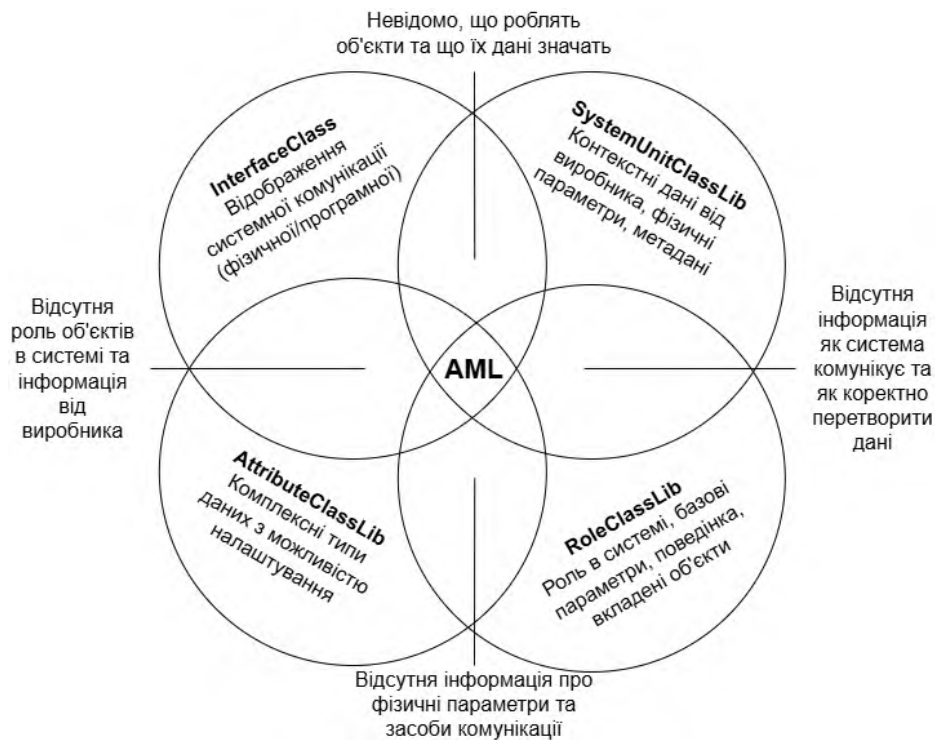
Сучасні системи теплозабезпечення зазнають глибокої трансформації, пов'язаної з переходом від централізованих схем до децентралізованих. Масове впровадження індивідуальних теплових пунктів, мікротелень, теплових насосів, сонячних колекторів та інших розподілених джерел тепла призводить до того, що теплопостачання об'єкта не є єдиною монолітною мережею, а перетворюється на складну мозаїку взаємопов'язаних автономних підсистем. Кожна з цих підсистем повинна бути узгоджена з іншими ланками для забезпечення загальної надійності та енергоефективності. Особливої актуальності набуває динамічна інтеграція додаткових ресурсів у систему опалення. Залежно від поточного стану мережі до роботи можуть бути залучені додаткові теплогенеративні потужності. Такі інтеграції можуть призводити до простоїв, тимчасово зменшувати надійність та ефективність роботи систем.

Важливим аспектом в сучасних умовах є максимізація надійності, узгодженості та інтероперабельності всіх компонентів децентралізованої системи теплозабезпечення. Необхідно забезпечити швидку та водночас якісну перебудову режимів роботи, оперативне залучення резервних джерел і безперервний моніторинг усього обладнання.

Ефективним інструментом розв'язання задачі є створення цифрових двійників [1] системи та всіх її підсистем. Цифровий двійник є віртуальною моделлю, яка в реальному часі за рахунок обміну даними з об'єктом точно відтворює його фізичний стан, поведінку, взаємодію компонентів і поточні параметри що дозволяє моделювати поведінку системи після інтеграції зовнішніх елементів, узгоджувати обмін даними між підсистемами та мати чітке представлення про порядок взаємодії між підсистемами.

Проте впровадження цифрових двійників породжує нову проблему - низьку інтероперабельність. Різні виробники обладнання постачають власні цифрові моделі, що можуть використовувати несумісні формати даних, різні стандарти опису об'єктів і протоколи обміну [2]. У результаті інтеграція двійників різних підсистем значно ускладнюється та сповільнюється.

Для подолання цієї проблеми запропоновано використати об'єктно-орієнтовану мову відтворення об'єктів *AutomationML (AML)* [3] у поєднанні з широко розповсюдженими та визнаними промисловими стандартами *ISA-88* та *ISA-95*. *AutomationML* забезпечує єдине структуроване представлення всієї ієрархії обладнання, його метаданих, технічних характеристик, інтерфейсів взаємодії та типів даних, зображене на рисунку. Стандарти *ISA-88/ISA-95* додають чітку модель керування процесами та інтеграцію між рівнями підприємства (від польового рівня до *MES/ERP*). Завдяки цьому досягається єдина семантика опису об'єктів незалежно від виробника.



Відображення структурних складових ієрархії об'єкту на мові AutomationML

AutomationML є ефективним інструментом відображення системи, однак, за своєю природою він є статичним і не підтримує динамічне оновлення параметрів у реальному часі, не має вбудованих механізмів підключення до джерел даних і не призначений для постійного зберігання оперативних показників.

Для усунення статичності AML запропоновано перенесення його структури в середовище Eclipse Ditto [4] – відкриту платформу для створення та керування цифровими двійниками IoT-систем, що дозволяє цифровому двійнику в реальному часі взаємодіяти з різними джерелами даних, оновлювати свої внутрішні показники, зберігати дані в історичну базу даних та забезпечує двосторонній обмін інформацією між віртуальною моделлю та фізичним обладнанням, водночас не втрачаючи інформативності та структурованості відображення AML.

Завдяки запропонованому підходу, статична модель об'єкту в AML перетворюється на динамічний цифровий двійник, здатний відображати всі зміни конфігурації мережі, інтеграцію зовнішніх джерел і поточний стан кожного елемента. Даний підхід підвищує інтероперабельність, надійність та узгодженість роботи в умовах високої динаміки децентралізованого теплозабезпечення.

1. Buchheit M., Ferraro A., Chaisung L. Digital Transformation in Industry White Paper : Біла кн. Industry IoT Consortium, 2020. 35 с

2. Schmidt C., Volz F., Stojanovic L. Schmidt C. Increasing Interoperability between Digital Twin Standards and Specifications: Transformation of DTDL to AAS. Sensors. 2023. Т. 23, вип. 19. URL: <https://doi.org/10.3390/s23187742>.

3. AutomationML / AutomationML Association. AutomationML Association, 2026. URL: <https://www.automationml.org/about-automationml/automationml/>.

4. Eclipse Ditto™: Open Source Framework for Digital Twins in the IoT / Eclipse Foundation. Eclipse Foundation, 2026. URL: <https://eclipse.dev/ditto/>

МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНОГО РЕЖИМУ РЕКТИФІКАЦІЙНОЇ КОЛОНИ

Геращенко В. В., Запорожець Ю. А.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, valerijgerashenko@gmail.com

Ректифікаційна колона є ключовим апаратом розділення складних вуглеводневих сумішей у процесах нафтопереробки. У даній роботі розглядається математичне моделювання статичного режиму ректифікаційної колони, в якій сировиною є рідкий продукт реакції гідрокрекінгу (очищений газойль). Колона працює з двома боковими отборами: легким бензином та фракцією вакуумного газойлю. Основними керованими параметрами процесу є температура та витрати продуктів. Метою моделювання є отримання статичної характеристики — залежності температури фракції вакуумного газойлю на виході колони від основного керуючого впливу (витрати теплоносія або теплового навантаження колони).

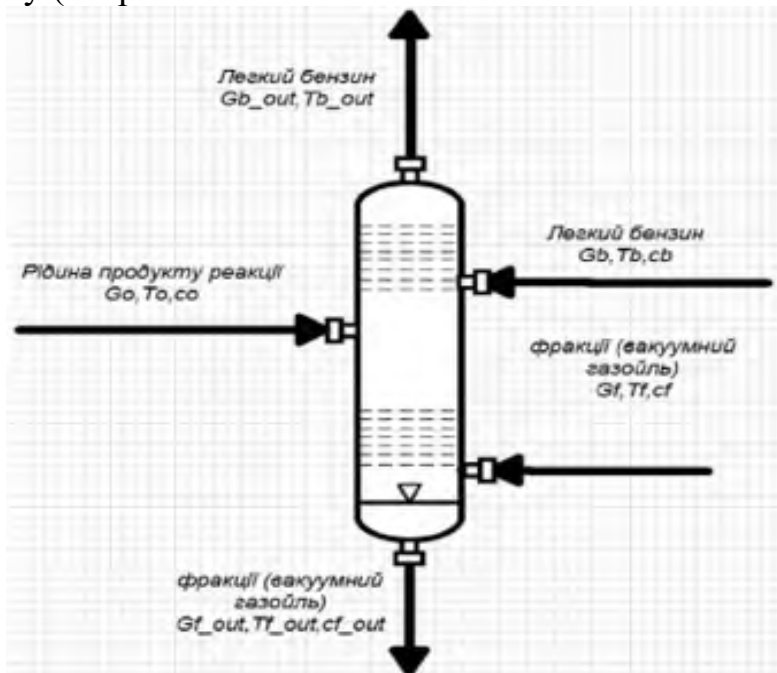


Рис. 1. Схема ректифікаційної колони з позначенням всіх потоків:

G_o , G_b , G_f – витрата рідини продукту реакції, легкого бензину і фракції (вакуумний газойль), що надходить до колони; T_o , T_b , T_f – температура рідини продукту реакції, легкого бензину і фракції; c_o , c_b , c_f – теплоємність рідини продукту реакції, легкого бензину і фракції; G_{b_out} , G_{f_out} – витрата легкого бензину, фракції (вакуумний газойль), що виходить із колони; T_{b_out} , T_{f_out} – температура легкого бензину, фракції на виході

У статичному режимі всі змінні не залежать від часу, тому математична модель колони зводиться до системи рівнянь матеріального, теплового та фазового балансу для кожної тарілки (теоретичної ступені розділення) [1].

Загальний тепловий баланс колони можна записати як:

$$Q_{вх} + \sum G_i h_i = \sum G_{out} h_{out} + Q_{втрат},$$

де основним джерелом тепла є підведення енергії у нижню частину колони (через теплообмінник або інший спосіб нагріву кубової рідини).

Для спрощення моделі розглядається тепловий баланс нижньої частини колони, де формується температура кубового продукту $T_{f,out}$. Температура в колоні суттєво залежить від теплового навантаження, яке визначається витратою гріючого агента (пари або горячого теплоносія), що подається в нижню частину апарату [2].

Основні рівняння теплового балансу нижньої секції колони мають вигляд:

$$F_s i_s p_s - F_s p_s c_c = F_r c_r (t_{r2} - t_{r1}) + Q_{\text{втрат}}$$

$$G_o c_o T_o + Q = G_b c_b T_b + G_f c_f T_f + G_{f,out} c_{f,out} T_{f,out}$$

де F_s – витрата гріючого агента (пари), м³/год; G_o , G_b , G_f , $G_{f,out}$ – витрати відповідно вхідного потоку, легкого бензину, фракції та кубового продукту; T_o , T_b , T_f , $T_{f,out}$ – температури відповідних потоків; Q – теплове навантаження колони

Як керовану величину обрано температуру фракції на виході колони $T_{f,out}$. Після спрощення рівнянь теплового балансу нижньої секції колони отримана статична характеристика – залежність температури кубового продукту від витрати нагрівального агента.

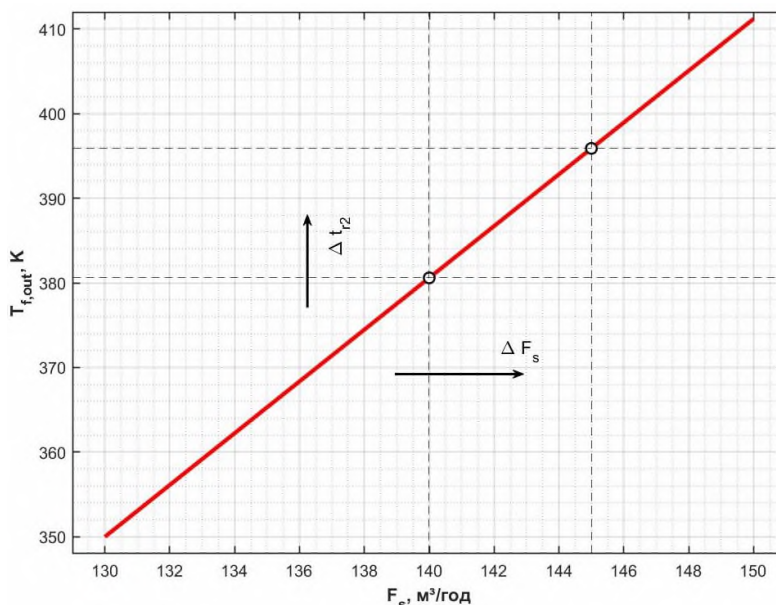


Рис. 2. Статична характеристика ректифікаційної колони

Коефіцієнт нахилу статичної характеристики становить:

$$k_1 = \Delta T_{f,out} / \Delta F_s = 3,059.$$

На рис. 2 представлено розрахункову статичну характеристику, побудовану в середовищі *MATLAB*. Залежність має лінійний характер у робочому діапазоні витрат гріючого агента від 130 до 150 м³/год.

1. Математичне моделювання процесів і систем [Електронний ресурс] : Навч. посіб. / А. І. Жученко, Л. Р. Ладієва, М. С. Піргач, Я. Ю. Жураковський; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,6 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 351 с.

2. Математичне моделювання систем і процесів [Текст]: Методичні вказівки до виконання практичних робіт для студентів спеціальностей: «Обладнання лісового комплексу»; «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів»; «Машини і технології пакування» / Уклад.: М. С. Піргач, Я. Ю. Жураковський. К.: НТУУ «КПІ», 2014. 42 с.

МОДЕЛЮВАННЯ СЕПАРАТОРА ЯК ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА АЗОТНОЇ КИСЛОТИ

Кагадій М. Ф., Квітка О. О.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, alexkvitka@gmail.com

У технологічній схемі виробництва азотної кислоти під тиском 0,716 МПа сепаратор забезпечує відокремлення рідкої фази азотної кислоти від нітрозного газу після конденсації. Саме на цій стадії формується слабка азотна кислота, яка надалі надходить в абсорбційну колону. Стабільність роботи сепаратора безпосередньо впливає на глибину поглинання оксидів азоту, кінцеву концентрацію кислоти та загальну продуктивність установки.

Математична модель сепаратора як динамічного об'єкту керування* дозволяє описати взаємозв'язки між параметрами газорідної суміші, оцінити вплив збурень та визначити керуючі дії. Розрахункова схема сепаратора наведена на рис. 1. Основним регульованим параметром сепаратора є витрата парогазової суміші $G_{\text{пс}}$ на вході, а керуючим впливом є концентрація азотної кислоти на виході $x_{\text{ак вих}}$. В якості збурення виступає концентрація азотної кислоти на вході $x_{\text{ак вх}}$.

Позначення	Параметри сепаратора
Вхідні	
$G_{\text{пс}}$	витрата парогазової суміші, кг/с;
$x_{\text{ак вх}}$	концентрація азотної кислоти на вході, %;
$x_{\text{нг вх}}$	концентрація нітрозних газів на вході, %;
Вихідні	
$G_{\text{ак}}$	витрата азотної кислоти, кг/с;
$x_{\text{ак}}$	концентрація азотної кислоти на виході, %;
$G_{\text{нг}}$	витрата нітрозних газів, кг/с;
$x_{\text{нг}}$	концентрація нітрозних газів на виході, %;

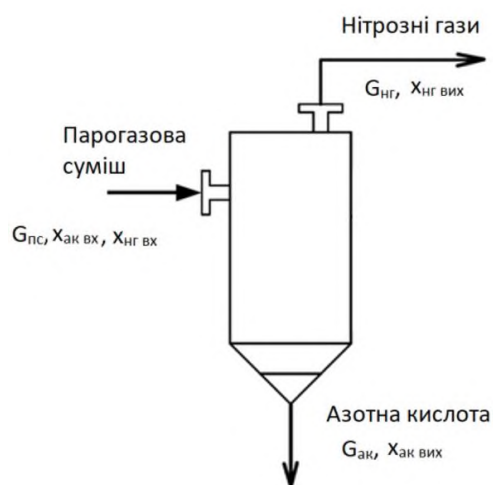


Рис. 1 – Розрахункова схема сепаратора

Математична модель сепаратора в динамічному режимі є рівнянням матеріального балансу за концентрацією азотної кислоти на виході апарата

$$G_{\text{пс}} (x_{\text{ак вх}} + x_{\text{нг вх}}) - G_{\text{нг}} x_{\text{нг вих}} = V \rho_{\text{ак}} \frac{dx_{\text{ак вих}}}{dt} \quad (1)$$

де V – об'єм сепаратора (м^3); $\rho_{\text{ак}}$ – густина азотної кислоти ($\text{кг}/\text{м}^3$); $G_{\text{пс}}$ та $G_{\text{нг}}$ – витрати парогазової суміші та нітрозних газів відповідно ($\text{кг}/\text{с}$).

* А. І. Жученко, Л. Р. Ладієва, М. С. Піргач, Я. Ю. Жураковський. Математичне моделювання процесів і систем. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 133 с.

Шляхом лінеаризації рівняння (1) за каналом керування і перетворення його до канонічного виду, отримуємо після перетворення за Лапласом передавальну функцію за каналом керування:

$$W_{кр}(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1} \quad (2)$$

де значення коефіцієнту підсилення $k_1 = 96,5$ та сталої часу $T_1 = 59,3$ обчислюємо з урахуванням відомих значень параметрів у сталому режимі.

В аналогічний спосіб отримуємо передавальну функцію за каналом збурення:

$$W_{зб}(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1} \quad (3)$$

де коефіцієнт підсилення $k_2 = 85,3$ а стала часу $T_2 = 44,7$.

Отже математична модель сепаратора, представлена у вигляді передавальних функцій за каналами керування та збурення, відповідно, має вигляд:

$$W_{кр}(p) = \frac{96,5}{59,3 p + 1} \quad W_{зб}(p) = \frac{85,3}{44,7 p + 1} \quad (4)$$

Отримані передавальні функції (4) є апаратними моделями типу аперіодичної ланки першого порядку та можуть бути безпосередньо використані для синтезу регуляторів системи автоматичного керування цього об'єкту.

На основі отриманих передавальних функцій отримані перехідні характеристики сепаратора. Перехідна характеристика за каналом керування («витрата парогазової суміші – концентрація азотної кислоти на виході») наведена на рис. 2.

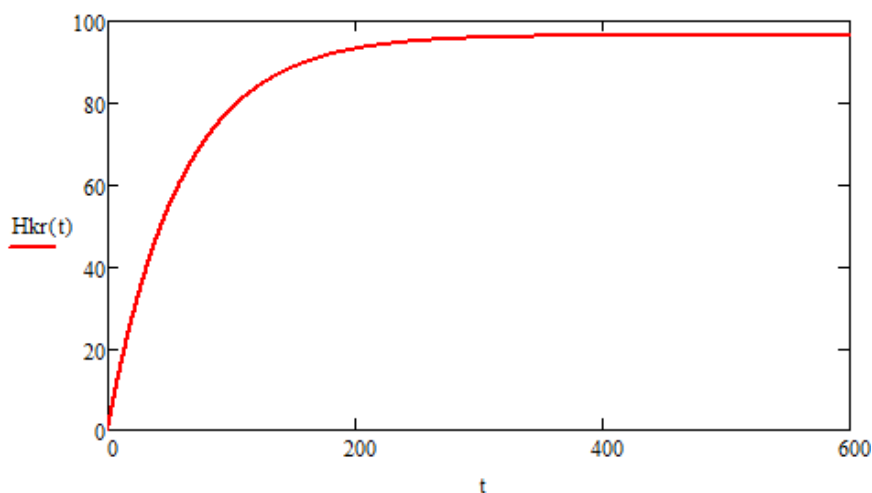


Рис. 2. Динамічна характеристика сепаратора за каналом керування

Проведений аналіз отриманих перехідних характеристик сепаратора дозволив оцінити його динамічні властивості, стабільність та швидкість реакції на зовнішні збурення. Отримані результати є основою для налаштування системи автоматичного керування об'єктом – сепаратором відповідно до вимог технологічного процесу.

АРХІТЕКТУРНІ ПАТЕРНИ БАГАТОКОРИСТУВАЦЬКОЇ ХМАРНОЇ SCADA-СИСТЕМИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ

Цуркан В. О., Ярощук Л. Д.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, vtsurkan2002@gmail.com

Комплексна автоматизація хіміко-технологічних систем (ХТС) виробництва добрив ускладнюється їхньою багатотоннажністю, безперервністю та великою інформаційною ємністю. Традиційні локальні SCADA-системи обмежені при масштабуванні до рівня географічно розподілених агрохімічних холдингів через високі витрати на розгортання IT-інфраструктури та неможливість централізованої акумуляції масивів даних (*Big Data*). Ефективним розв'язанням цієї проблеми є перехід до моделі *SCADA-as-a-Service* на базі багатокористувацької (*Multi-Tenant*) хмарної архітектури [1].

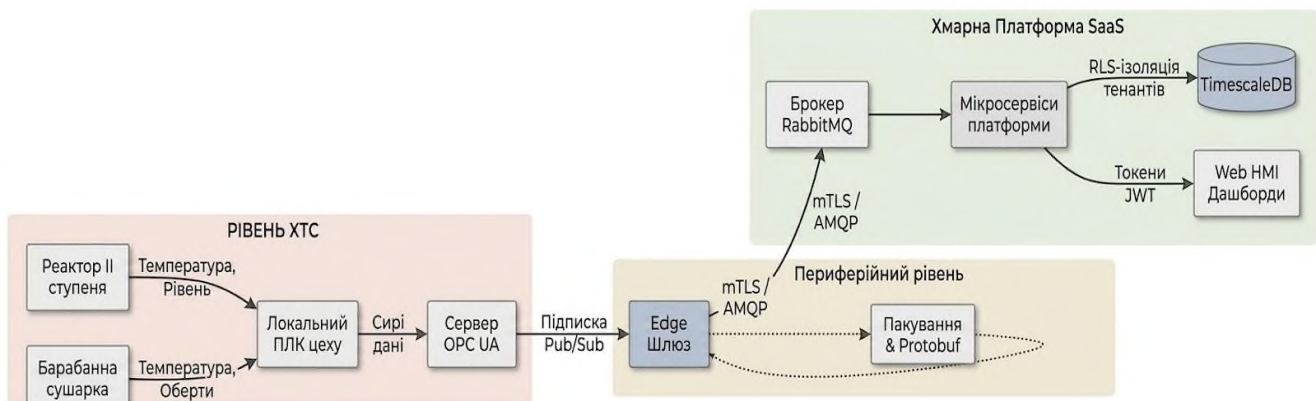
Метою дослідження є підвищення оперативності та надійності збору, обробки та збереження великих масивів технологічних даних шляхом розробки багатокористувацької хмарної SCADA-системи в складі систем автоматизації виробництв гранульованих добрив з безперервним типом ХТС.

Об'єктом дослідження є виробництво подвійного суперфосфату потоковим методом. Базовим сегментом аналізу є реактори I–II ступенів синтезу суперфосфату та барабанна гранулятор-сушарка (БГС). Джерела даних поділено на безперервну телеметрію, що зчитується ПЛК та агрегується локальним сервером *OPC UA*, і дискретні лабораторні дані, які вносяться вручну через веб-*HMI* та асинхронно узгоджуються з часовими рядами.

У багатокористувацькій парадигмі, де хмарна платформа обслуговує десятки подібних заводів одночасно, сумарний потік телеметрії формує навантаження класу *Big Data*, що вимагає специфічних архітектурних підходів. Ключовою сполучною ланкою системи є периферійний шлюз (*Edge Collector*). Для збору даних шлюз не використовує застарілу модель циклічного опитування (*Polling*). Натомість інтеграція побудована на базі сучасного стандарту *OPC UA Pub/Sub*. Шлюз виступає підписником (тобто програмним вузлом, який не запитує дані постійно, а приймає їх виключно за фактом зміни значень), який асинхронно отримує потоки оновлень від сервера, що радикально знижує навантаження на цехові контролери.

Для транспортування телеметрії у хмару обґрунтовано вибір протоколу *AMQP* (брокер *RabbitMQ*). На відміну від *MQTT*, *AMQP* забезпечує транзакційну надійність (*Publisher Confirms*), гарантуючи, що шлюз видалить дані з локального буфера лише після підтвердження успішного запису брокером. Для оптимізації трафіку в 4G-мережах шлюз пакує телеметрію в батчі (*Batching*) та серіалізує її у надкомпактний бінарний формат *Protocol Buffers*.

Узагальнену структурну схему обробки інформаційних потоків у системі керування процесами синтезу та сушіння суперфосфату (наскрізний шлях телеметрії від технологічних апаратів до хмарної платформи) наведено на рисунку.



Структурна схема системи обробки інформаційних потоків багатокористувацької хмарної SCADA-системи виробництва суперфосфату

Специфіка обробки даних ХТС зумовила застосування у розробленій системі баз даних часових рядів (*TSDB*) [2]. Вибір зроблено на користь *TimescaleDB* (розширення *PostgreSQL*). На відміну від *InfluxDB*, де індекс метаданих зберігається в *RAM*, *TimescaleDB* використовує дискові *B-tree* індекси гіпертаблиць, що дозволяє системі працювати стабільно навіть за екстремально високої кардинальності в багатокористувацькому середовищі.

Замість створення окремих баз даних для кожного клієнта (*Database-per-tenant*) впроваджено стратегію *Row-Level Security (RLS)*. Усі дані записуються в єдину спільну гіпертаблицю з обов'язковим ідентифікатором організації (*organization_id*). При обробці запиту бекенд встановлює контекст сесії, а *PostgreSQL* на рівні ядра блокує доступ до чужих даних на етапі вибірки. Передача даних захищена архітектурою *Zero Trust (mTLS та JWT)*.

Запропонована програмно-апаратна архітектура багатокористувацької хмарної SCADA-системи успішно вирішує проблему консолідації даних географічно розподілених хімічних виробництв. На відміну від наявних локальних систем, масштабування яких вимагає лінійного дублювання серверної інфраструктури на кожному новому об'єкті, обґрунтоване застосування моделі *OPC UA Pub/Sub*, протоколу *AMQP* та *TimescaleDB* з механізмом *RLS* створює оптимізований фундамент для переходу підприємств до моделі *SCADA-as-a-Service* та впровадження алгоритмів глобальної оптимізації ХТС.

1. Boyes H., Hallaq B., Cunningham J., Watson T. The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*. 2018. Vol. 101. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.com-pind.2018.04.015.

2. Liu R., Yuan J., Huang X. Benchmarking Time Series Databases with IoTDB-Benchmark for IoT Scenarios. *arXiv preprint arXiv:1901.08304*. 2019. URL: <https://arxiv.org/abs/1901.08304>.

СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБАСТНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Жук А. Р., Ситніков О. В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, zhuk.a.r.-la22@edu.kpi.ua

Керування кутовою швидкістю обертання в системах прецизійного електропривода вимагає високої точності при зміні моменту навантаження. Динаміка об'єкта описується передавальною функцією другого порядку, що враховує електричну та механічну сталі часу:

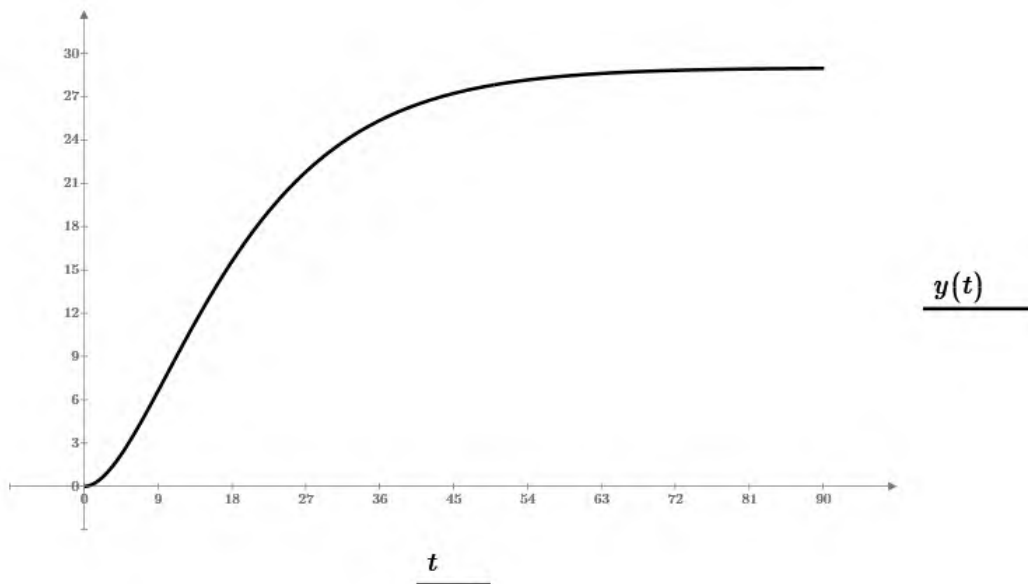
$$W(s) = \frac{K}{(T_e s + 1)(T_m s + 1)}$$

де K – передавальний коефіцієнт; T_e – електромагнітна стала часу; T_m – механічна стала часу.

Теоретичною базою для синтезу регулятора обрано **метод частотної корекції**. Ідея полягає у формуванні такої структури ПІД-регулятора, яка забезпечує фазовий запас стійкості навіть при збільшенні механічного навантаження на 40 %. Робастність досягається за рахунок усереднення параметрів для ансамблю можливих значень T_m .

Параметри налаштування модального регулятора

Варіант налаштування	K_p	T_i	T_d	Оцінка якості
Розрахунковий	2,1	41	10,9	0,835
Робастний	1,66	58	13,5	0,972



Реакція системи на стрибок заданої швидкості

Аналіз отриманої кривої перехідного процесу, зображеної на рисунку дозволяє комплексно оцінити динамічні та статичні властивості синтезованої системи керування електроприводом. За результатами моделювання встано-

влено, що після завершення динамічних коливань система виходить на стабільний рівень із показником усталеної швидкості $\omega_{уст} = 150,0$ рад/с, що повністю відповідає заданому програмному впливу. Процес виходу на цей рівень характеризується високою швидкодією: час регулювання (t_{reg}) становить лише 0,42 с, що є критично важливим для прецизійних приводів, які працюють у режимах із частими пусками та зупинками. При цьому спостерігається помірне перерегулювання (σ) на рівні 11,4 %, що свідчить про оптимальний баланс між демпфуванням системи та її реактивністю, оскільки цей показник не перевищує встановлений технологічний ліміт у 15 % для даного класу обладнання. Особливу увагу слід звернути на відсутність статичної похибки – завдяки впровадженню інтегральної складової в алгоритм ПД-регулятора, помилка в усталеному режимі дорівнює нулю, що підтверджує високу точність відпрацювання завдання незалежно від величини статичного навантаження на валу.

Проведене дослідження доводить, що застосування робастного налаштування на основі методу логарифмічних частотних характеристик (ЛЧХ) дозволяє ефективно мінімізувати вплив варіації параметрів двигуна, таких як зміна моменту інерції або коливання активного опору обмоток, на підсумкову якість керування. Отримані дані підтверджують стійкість системи в усьому робочому діапазоні частот та її здатність підтримувати задані показники якості за умов зовнішніх збурень, що є ключовим для забезпечення надійності складних технічних комплексів.

1. Бабіченко А. К. Промислові засоби автоматизації: навч. посіб. : У 2 ч. Харків : НТУ «ХП», 2003. Ч. 1. Вимірювальні пристрої. 470 с. ISBN 966-593-232-2.

2. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтегр. технології. Київ : НТУУ «КПІ», 2008. 236 с. ISBN 978-966-622-287-2.

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОДУКЦІЙ І НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ НАВЧАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Темніков А. В.¹, Темнікова О. Л.²

¹Державний університет «Київський авіаційний інститут», temnikoff@ukr.net

²КПІ ім. Ігоря Сікорського, temnikova_elen@ukr.net

Ефективність сучасних інтелектуальних навчальних систем (ІНС) безпосередньо залежить від якості модуля контролю знань [1]. Цей компонент відповідає не лише за перевірку відповідей, а й за динамічну адаптацію навчального процесу під потреби конкретного учня. Розробка такого модуля базується на відповідності наступним вимогам: структурна цілісність графа знань, гнучкі алгоритми побудови траєкторії перевірки та інтелектуальні методи оцінювання [2].

Основою модуля є граф на відношення підпорядкування залежностей правил і понять (діаграми Гассе). Такий граф відповідає низці логічних вимог і дозволяє будувати адаптивну траєкторію перевірки [3]. Основне правило: не можна перевіряти складне поняття, поки не підтверджено засвоєння всіх його передумов. Тут стратегії формування маршруту можуть бути лінійними (послідовність від простого до складного); адаптивними (маршрут змінюється динамічно) [4].

Для формалізації логіки викладача використовуються продукційні правила типу: *IF* (умова) *THEN* (дія). Архітектурно цей механізм реалізується як продукційна система, що складається з бази правил, робочої пам'яті (факти про учня) та інтерпретатора (машинні виведення) [1, 2]. Це дозволяє системі реагувати на дії учня в реальному часі. Існує можливість безпосередньо прямого виведення від засвоєння бази до переходу на новий рівень. Також можна організувати зворотний аналіз: якщо допущено помилку у складному завданні, система автоматично ініціює перевірку «фундаментальних» знань, на яких воно базується (використовується представлення бази правил у діаграмі Гассе).

Функціонування системи може бути організовано в режимі підтвердження: якщо учень успішно розв'язує складне завдання, система через продукційні правила може автоматично помітити всі базові теми як засвоєні, навіть якщо вони не перевірялися окремо. А може адаптивно реагувати на помилку: (*IF* (учень не засвоїв *R5*) *THEN* (зупинити перевірку та активувати повторення *R1* і *R2*, наприклад) [4].

Традиційне бінарне оцінювання («знає/не знає») часто не відображає реальний стан підготовки. Застосування теорії нечітких множин дозволяє розглядати рівень знань як ступінь в діапазоні від 0 до 1 – функція прилежності $\mu_A(x)$ висловлює рівень впевненості щодо рівня знань учня, де значення 1 означає повне засвоєння, а 0 — повну відсутність знань. На відміну від традиційних балів, такий показник відображає варіативність знань учня [5].

Однією з найбільших переваг нечіткої логіки є можливість використання лінгвістичних термів, які є природними для сприйняття людиною. Система оперує шкалою категорій: «дуже низький», «низький», «посередній», «високий» та «відмінний» рівень знань. Кожна категорія відповідає певному інтервалу функції при-

належності (наприклад, «задовільно» може відповідати діапазону 0,65–0,74), причому переходи між ними є плавними, а не різкими [5].

Синтез продукцій і нечіткої логіки у модулі контролю знань досягається за рахунок переходу до нечітких умов в правилах, використання лінгвістичних термів у логіці виведення, агрегації та зворотного аналізу, динамічного оновлення робочої пам'яті [6].

Система може оперувати категоріями, які зрозумілі викладачу та учню, інтегруючи їх безпосередньо в базу правил. Такий підхід забезпечує гнучкість не лише в математичних розрахунках, а й у комунікації з користувачем/

IF (рівень знань = «низький») *THEN* (запропонувати додаткові пояснення і повторне тестування).

IF (рівень знань = «високий») *THEN* (перейти до наступного тематичного блоку без додаткової перевірки).

Коли система виявляє помилку, вона використовує нечіткі оцінки для уточнення глибини проблеми під час зворотного проходу по графу. Для кожного поняття в моделі учня фіксується не лише статус, а й ступінь впевненості, що базується на кількості спроб, типах помилок та швидкості відповіді. Система може формувати агреговані оцінки, наприклад: «переважно добрий рівень знань, з необхідністю поглиблення окремих тем», що дозволяє уникнути спрощеного оцінювання, та забезпечує комплексний висновок [6, 7].

Інтелектуальні методи оцінювання, що засновані на поєднанні графових моделей, продукційних систем та нечіткої логіки, дозволяють імітувати мислення досвідченого викладача, забезпечуючи індивідуальний підхід до кожного учня і високу якість дистанційного та автоматизованого навчання.

1. Мороховець Г. Ю. Тестування як форма контролю знань здобувачів вищої освіти / Г. Ю. Мороховець, Ю. В. Лисанець // Сучасна медична освіта: методологія, теорія, практика : матеріали Всеукр. навч.-наук. конф. з міжнар. участю, м. Полтава, 19 березня 2020 р. Полтава, 2020. С. 144–145.

2. Шевчук О. Б. Інтелектуальні навчальні системи: принципи побудови / О. Б. Шевчук // Наукові записки Бердянського державного педагогічного університету. Бердянськ : 2017. Вип. 42. С. 223–228.

3. Темнікова О. Л., Рівкінд О. Й. Моделювання проблемної області інтелектуальної навчальної системи / О. Л. Темнікова, О. Й. Рівкінд // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. 2008. № 8(126). С. 283–287.

4. Темнікова О.Л., Темніков А.В. Підхід до моделювання проблемної області інтелектуальної навчальної системи // Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання». Матеріали конференції. Івано-Франківськ: ПНУ, 2025. С.51–52

5. Zadeh L. A. Fuzzy logic = computing with words. IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 1996. Vol. 4, Iss. 2. P. 103–111. <https://doi.org/10.1109/91.493904>.

6. Mendel J. M. Type-2 fuzzy sets and systems: An overview. IEEE Computational Intelligence Magazine. 2007. Vol. 2, Iss. 1. P. 20–29. <https://doi.org/10.1109/MCI.2007.380672>

7. Mendel J. M., Wu D. Perceptual computing. Aiding people in making subjective judgments. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2010. 256 p.

СТВОРЕННЯ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОЇ СХЕМИ ПІДГРІВАЧА ВОДИ

Канцур М. О., Запорожець Ю. А.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, mkancur6@gmail.com

Процес конверсії оксиду карбону є одним із ключових і визначальних етапів у технологічному ланцюгу виробництва водню або азотоводневої суміші. Саме на цьому етапі відбувається хімічне перетворення оксиду карбону, що безпосередньо впливає на ступінь очищення газової суміші від домішок, зокрема від оксиду карбону, який є небажаним компонентом у подальших стадіях синтезу. Ефективність цього процесу визначає якість кінцевого продукту, стабільність роботи обладнання та економічні показники виробництва загалом.

У процесі конверсії оксиду карбону можуть виникати різноманітні технологічні ускладнення, пов'язані з коливанням виробничого навантаження, змінами теплових режимів на попередніх стадіях підготовки газу або необхідністю проведення технічного обслуговування та ремонту суміжного обладнання. Усі ці фактори призводять до нестабільності вхідних параметрів потоків, таких як температура, тиск, склад газової суміші та її витрата. Внаслідок цього ускладнюється підтримання оптимальних умов перебігу реакції, що може негативно позначатися на ступені конверсії та енергоефективності процесу.

З метою забезпечення стабільної роботи установки та підтримання необхідних технологічних параметрів особливу увагу приділяють контролю теплових режимів. Одним із важливих елементів у цьому контексті є стадія остаточного охолодження конвертованого газу. Для її реалізації застосовують поверхневі теплообмінники, зокрема підігрівачі води, які виконують подвійну функцію: з одного боку, забезпечують зниження температури газу до заданого рівня, а з іншого – утилізують теплоту для нагрівання живильної води.

У теплообміннику конвертований газ повинен охолоджуватися до температури не вище 85 °С перед подачею в абсорбер. Це є критично важливою умовою для ефективного протікання подальших процесів очищення газу. Охолодження здійснюється за рахунок передачі тепла від гарячого газового потоку до недеаерованої живильної води, яка, у свою чергу, нагрівається і може бути використана в інших технологічних операціях, що підвищує загальний коефіцієнт корисного використання енергії на підприємстві.

Таким чином, для забезпечення надійної та ефективної роботи теплообмінного обладнання необхідно розробити структурно-параметричну схему підігрівача води. Така схема повинна враховувати основні технологічні параметри процесу, характеристики теплоносіїв. Розроблення цієї схеми дозволить оптимізувати процес теплообміну, підвищити енергоефективність установки та забезпечити стабільність технологічного процесу в цілому.

На рис. 1 представлено схематичне зображення підігрівача води. Основними параметрами є температура конвертованого газу на вході та виході, витрата газу, витрата живильної води, температура води на вході та виході.

Регульованою величиною, що зумовила використання підігрівача води в технологічній схемі, є температура конвертованого газу на виході T_{g2} .

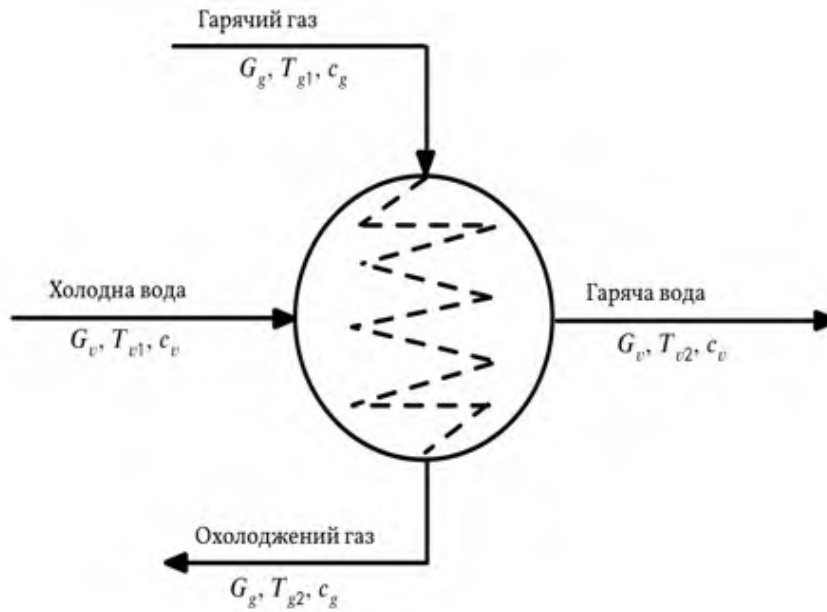


Рис. 1. Схема підігрівача води:

G_v – витрата живильної води; T_{g2}, T_{v2} – температури конвертованого газу і води на виході; G_g, T_{g1} – витрата та температура конвертованого газу на вході; T_{v1} – температура води на вході

Регульованою величиною, що зумовила використання підігрівача води в технологічній схемі, є температура конвертованого газу на виході T_{g2} .

На якісну величину, а саме температуру газу на виході T_{g2} , можна впливати витратою живильної води. Відповідно, керування буде виконуватися за рахунок зміни витрати води G_v .

Варто зауважити про можливе збурення, яким може виступати температура газу на вході T_{g1} , що зумовлено коливаннями теплового навантаження або зміною технологічного режиму, тобто зміною температури газу після кип'ятильників, з яких він надходить у підігрівач води.

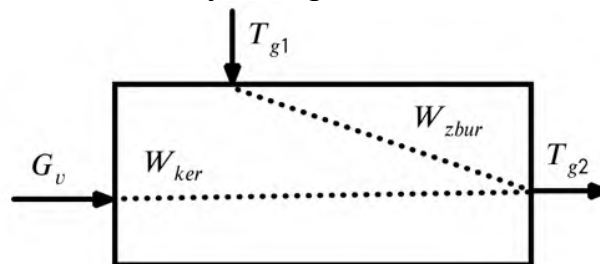


Рис. 2. Структурно-параметрична схема досліджуваних каналів керування та збурення підігрівача води

На рис. 2 наведена структурно-параметрична схема підігрівача води із зазначенням динамічних каналів: керування $G_v \rightarrow T_{g2}$, збурення $T_{g1} \rightarrow T_{g2}$.

Використання структурно-параметричної схеми підігрівача води дозволить формалізувати процес теплообміну та конденсації у вигляді математичної моделі, яка може бути використана для аналізу та синтезу систем автоматичного керування.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПАЯННЯ У ДРІБНОСЕРІЙНОМУ ВИРОБНИЦТВІ: ДОСТУПНІ РІШЕННЯ ДЛЯ МАЛОГО БІЗНЕСУ

Карпенко В. С., Курбан С. В., Ющенко А. О., Коротинський А. П.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, karpenko.vladislav@iill.kpi.ua

Як в мирний час, так і у період війни малі підприємства продовжують бути важливим елементом економічної системи України і виконувати ряд соціально значущих функцій. Вони забезпечуючи нові робочі місця, виробляють необхідну суспільству продукцію, збільшують конкуренцію на ринку. Однак на початку війни малий бізнес зіткнувся із суттєвими викликами та загрозами, які призвели до втрати фінансової стійкості, заборгованості за сплатою податків, збитковості, а в ряді випадків і до банкрутства, яке обумовлене відсутністю джерел для покриття втрат і відновлення активності*. З огляду на зазначені виклики, особливої актуальності набуває впровадження доступних інноваційних рішень, які здатні підвищити ефективність діяльності малого бізнесу без значних інвестиційних витрат. Саме такі технології стають важливим інструментом збереження конкурентоспроможності та повноцінного функціонування малих підприємств.

Прикладом реалізації такої технології може слугувати розробка та впровадження автоматизованої системи пайки. Автоматичний робот-паяльщик є ефективною альтернативою дорогим промисловим комплексам, таким як FANUC для малого бізнесу, лабораторій та дрібносерійного виробництва.

На відміну від складних промислових маніпуляторів, які вимагають значних капіталовкладень, а інколи й реінжинірингу виробничих ліній, цей пристрій дозволяє забезпечити мінімальний поріг входу та зменшити економічні та технологічні витрати. Основною перевагою запропонованого програмно-апаратного комплексу є простота розгортання та швидкий запуск комплексу в роботу.

Запропоноване рішення складається з таких етапів.

Етап 1. Аналіз партій та підготовка ложементу. Для автоматизації відбираються плоскі плати з вивідними компонентами (ТНТ) або роз'ємами, де всі точки пайки знаходяться в одній площині. Під їхні габарити виготовляється базова оснастка (ложемент) для точної фіксації заготовки.

Етап 2. Підготовка та завантаження керуючої програми.

Готовий алгоритм (із координатами точок пайки, профілем температур та об'ємом подачі припою) експортується працівником на SD-карту, яка встановлюється безпосередньо в робота-паяльника.

Етап 3. Ініціалізація комплексу. В налаштуваннях працівником запускається калібрування (виведення осей у базові нульову координати). Робоче жало розігрівається до заданої температури, після чого система готова до старту.

* Карпенко Є. А., Копайгора І. С., Карпенко В. С. Малі підприємства: фінансовий стан в умовах війни та міжнародний досвід оподаткування / *Науково-виробничий журнал «Бізнес-навігатор»*. 2024. №3(76). С. 54-59.

Етап 4. Робочий цикл. Робот-паяльник автономно виконує програму. Автоматика самостійно витримує час прогріву контактів та точно дозує подачу припою для кожного контакту, повністю виключаючи людський фактор, а отже мінімізує помилки.

Етап 5. Контроль якості. Завершений вузол проходить швидкий візуальний огляд. Завдяки механічній точності позиціонування гарантується стабільне формування правильних з'єднань без браку чи перегріву.

Етап 6. Розвантаження та заміна. Оператор знімає магнітні затискачі, вилучає готову продукцію з ложементу і встановлює нову заготовку для безперервного повторення циклу.

Основною задачею програмно-апаратного комплексу є автоматизація процесу фіксації компонентів методом пайки на друковані плати за допомогою системи числового програмного керування (ЧПК). Для переміщення жала паяльника використовується чотирьохвісна система позиціонування (O_x , O_y , O_z , та ротаційна вісь OR), що дозволяє виготовляти плати з щільним розміщенням компонентів на ній. Для визначення координат використовується система з кінцевими вимикачами (End-stop). Рух забезпечується п'ятьма моторами Nema 17 модель 42BYGH247-1684A з ремінними, гвинтовими та прямими приводами. Схема робота-паяльника та головного блоку управління наведено на рисунку.



Загальний вигляд робота та головного блоку управління

За рахунок використання ложементу та магнітних прижимів плати унеможливується зміщення компонентів у процесі роботи. В якості паяльного пристрою використовується *NEWACALOX 180...500 °C Digital Display Soldering Gun* з автоматичною подачею припою та регулюванням температури.

Контролером виступає плата *Arduino Mega 2560 R3* до якої підключено драйвери для управління моторами та реле. Охолодження здійснюється за допомогою потоку повітря керованого потоку повітря. Для перенесення програми передбачено слот *SD*, взаємодія з комплексом відбувається за допомогою *TFT*-дисплею.

Запропонована малогабаритна чотирьохвісна система на базі апаратно обчислювальної платформи *Arduino*, що дозволяє автоматизувати прецизійний монтаж компонентів в умовах дрібносерійного виробництва без значних капіталовкладень. Завдяки високій точності позиціонування (до 0,1 мм) та автоматизованому керуванню, установка забезпечує стабільну якість з'єднань і швидкий запуск робочих процесів.

ЗАДАЧА АВТОМАТИЗАЦІЇ РЕКУПЕРАТОРА ПОВІТРЯ НА БАЗІ МІКРОКОНТРОЛЕРА

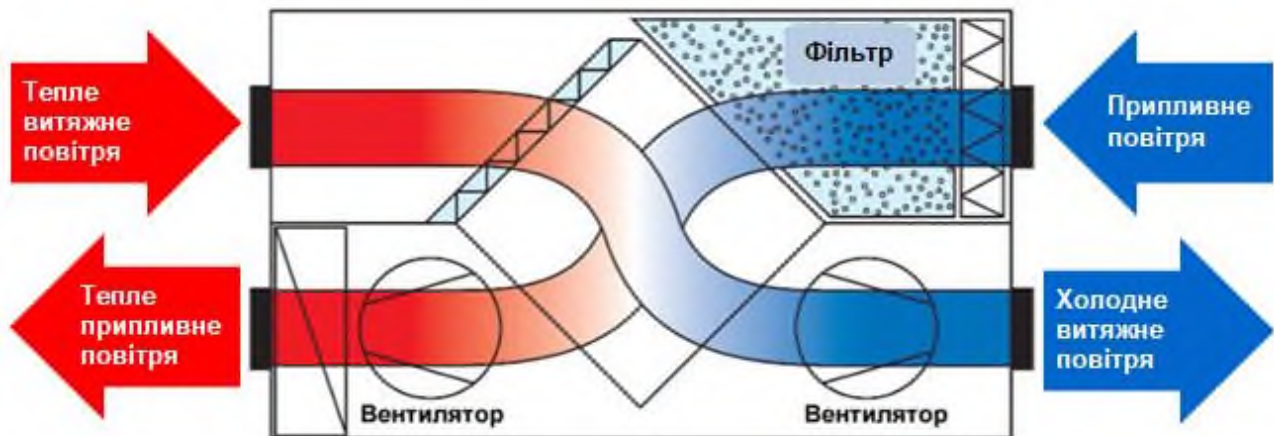
Самолюк В. С., Квітка О. О.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, alexkvitka@gmail.com

Якість повітря в приміщеннях є критично важливим фактором, що впливає на здоров'я, працездатність та комфорт людини. Відомо, що сучасна людина проводить більшу частину часу у закритих просторах, де недостатня вентиляція призводить до накопичення вуглекислого газу, летких органічних сполук та надлишкової вологості. Це, у свою чергу, негативно впливає на когнітивні функції та загальний стан організму.

Традиційні методи вентиляції, такі як провітрювання або використання витяжних систем, супроводжуються значними втратами теплової енергії. У холодний період року ці втрати можуть досягати 30–50 % загального теплового балансу будівлі. Використання рекуператорів дозволяє значно підвищити енергоефективність за рахунок повернення до 95 % теплової енергії витяжного повітря для підігріву припливного [1].

Принцип роботи рекуператора ґрунтується на теплообміні між двома повітряними потоками без їх змішування через теплообмінну поверхню (див. рисунок). Найбільш поширеними є пластинчасті рекуператори, які характеризуються високою ефективністю, простотою конструкції та надійністю.



Принцип роботи рекуператора

Ефективність функціонування системи вентиляції значною мірою залежить від алгоритмів керування. Використання фіксованих режимів роботи не забезпечує оптимального балансу між якістю повітря та енергоспоживанням. У зв'язку з цим набули поширення системи керування за потребою (*DCV*), які регулюють продуктивність вентиляції залежно від концентрації CO_2 та інших параметрів. Такі системи дозволяють знизити енергоспоживання на 20–60 % [2] при збереженні якості повітря на належному рівні.

Комерційні системи автоматизації *HVAC* (*Heating, Ventilation, & Air Conditioning*) є функціонально розвиненими, проте їх висока вартість (від \$2000 до \$5000

тільки за контролер) та закритість обмежують використання у побутовому секторі. Також існуючі рішення зазвичай не підтримують віддаленого моніторингу та *cloud-based* аналітики, які стають стандартом для IoT-пристроїв. Альтернативою є застосування мікроконтролерів, таких як Arduino або ESP32, що забезпечують достатню обчислювальну потужність, наявність вбудованих засобів зв'язку, інтеграцію з хмарними платформами та низьку вартість. Також відкритість та модульність таких рішень дозволяє адаптувати систему під конкретні потреби різних типів приміщень з можливістю подальшого масштабування.

Запропонована система автоматизації рекуператора повинна реалізовувати багатопараметричне керування з урахуванням температури, вологості, концентрації CO₂ та інших показників якості повітря. Для цього можуть застосовуватися класичні PID-регулятори, які забезпечують швидку реакцію системи, а також більш складні підходи, такі як MPC, що дозволяє враховувати обмеження системи та оптимізувати стратегію керування на кроки вперед.

Перспективним напрямом є використання технологій Інтернету речей (IoT), що дозволяє здійснювати віддалений моніторинг та керування системою, а також накопичення даних для подальшого аналізу. Інтеграція з хмарними сервісами відкриває можливості застосування методів машинного навчання для прогнозування потреби у вентиляції та оптимізації режимів роботи системи. Алгоритми на основі нейронних мереж, зокрема *LSTM (Long Short-Term Memory)*, демонструють здатність прогнозувати майбутню потребу в вентиляції на основі накопичених даних про присутність людей, погодні умови та розклад використання приміщення. Підходи на основі *Reinforcement learning* дозволяють навчити систему оптимально балансувати між енергоефективністю та комфортом користувачів шляхом багаторазової взаємодії з середовищем. Проте практичне впровадження цих методів стикається з проблемою обмежених обчислювальних ресурсів *edge*-пристроїв. З огляду на це, гібридні архітектури, де складні обчислення виконуються в хмарі, а критичні функції керування залишаються локальними на мікроконтролері, пропонують оптимальний баланс між функціональністю та надійністю.

Таким чином, розробка доступної та ефективної системи автоматизації рекуператора на базі мікроконтролера є актуальним науково-технічним завданням, що дозволяє підвищити енергоефективність будівель та покращити якість повітря в приміщеннях.

1. Mardiana-Idayu A., Riffat S. B. Review on heat recovery technologies for building applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, No. 2. P. 7–29.

22. Fisk W. J., De Almeida A. T. Sensor-based demand-controlled ventilation: a review // *Energy and Buildings*. 1998. Vol. 29, No. 1. P. 13–23.

КЕРУВАННЯ ПІДГРІВОМ КОМПОНЕНТІВ РЕАКЦІЙНОЇ СУМІШІ В ПРОЦЕСІ ТРИ-РИФОРМІНГУ МЕТАНУ

Трищ В. Р., Ковалюк Д. О.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, trishch1212@gmail.com

Виробництво синтез-газу (H_2/CO) методом три-риформінгу метану (ТРМ) є одним із ключових процесів виробництва водню та синтез-газу, що має широке застосування у промисловості. ТРМ поєднує паровий риформінг, сухий риформінг та часткове окиснення метану в одному реакторі [1]. Процес ТРМ дозволяє безпосередньо утилізувати димові гази електростанцій як сировину, що суттєво знижує викиди CO_2 та підвищує енергетичну ефективність. Серед ключових переваг ТРМ – гнучкість у регулюванні співвідношення H_2/CO , висока конверсія метану та можливість мінімізації коксоутворення.

Оптимальний режим протікання цього процесу може значно збільшити кількість отриманого водню. Одним із факторів, який дозволяє підвищити ефективність процесу ТРМ є феномен консервативно-збуреної рівноваги (КЗР). В роботах [2] та [3] показано, що КЗР може забезпечити концентраційні залежності вищі за рівноважні, таким чином забезпечити «надрівноважну» концентрацію. Ефективність реактора, в якому протікає процес ТРМ значною мірою визначається його температурним режимом, а також значеннями початкового складу суміші [4].

Теплообмінники у складі реактора ТРМ відіграють критичну роль: вони забезпечують підігрів реакційних компонентів до температури реакції.. Конструктивно теплообмінник виконаний як дво потоковий апарат, у якому реагент рухаються у міжтрубному просторі, а теплоносій – у трубному просторі в протитечії.

Коректне математичне моделювання теплообмінника дозволяє синтезувати ефективну систему автоматичного керування та забезпечити підтримання оптимальних технологічних параметрів процесу. На сучасному етапі розвитку спеціалізованих програмних засобів та обчислювальних інструментів, все більше дослідників використовують пакет COMSOL Multiphysics. На рисунку 1 наведено розподіл температури по довжині теплообмінника як для теплоносія (перегріта пара), так і для реакційного компонента газової суміші.

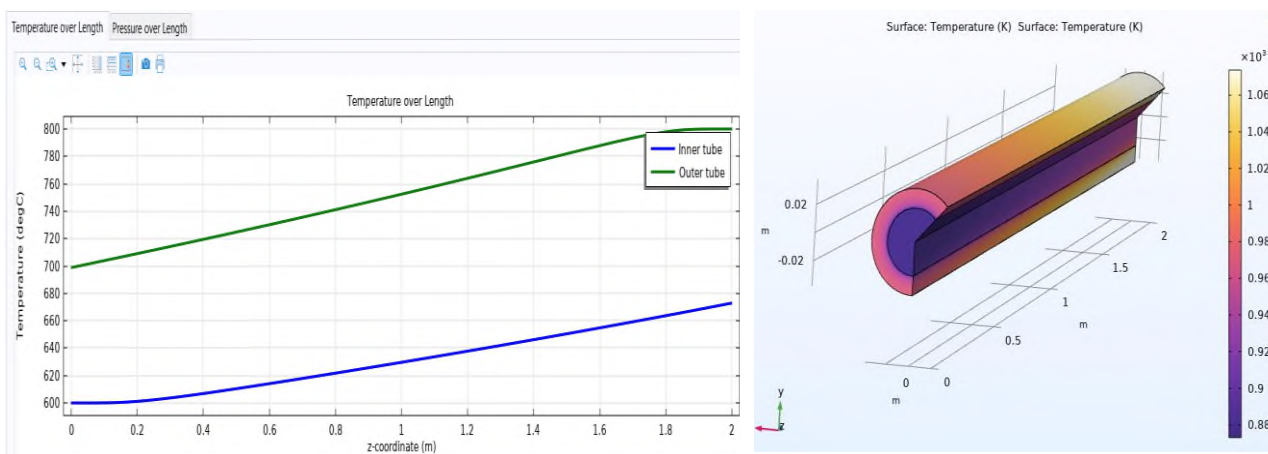


Рис. 1. Розрахунок теплових потоків теплообмінника

Результати моделювання отримані для статичного режиму відображають плавний градієнт температури вздовж усього теплообмінника без різких стрибків, що свідчить про правильно підбрану швидкість потоку теплоносія. Рух в протилежних напрямках забезпечує рівномірний розподіл температурного поля та запобігає виникненню локальних перегрівів ("гарячих точок"). Аналіз температурних полів у поперечному перерізі реактора підтвердив рівномірний розподіл температури, що є необхідною умовою стабільної роботи каталізатора та запобігання його термічній дезактивації.

Для ідентифікації передатної функції за каналом керування подамо на вхід об'єкту одиничний ступінчастий сигнал – збільшимо витрату. Параметри процесу та перехідна характеристика подані на рисунку 2.

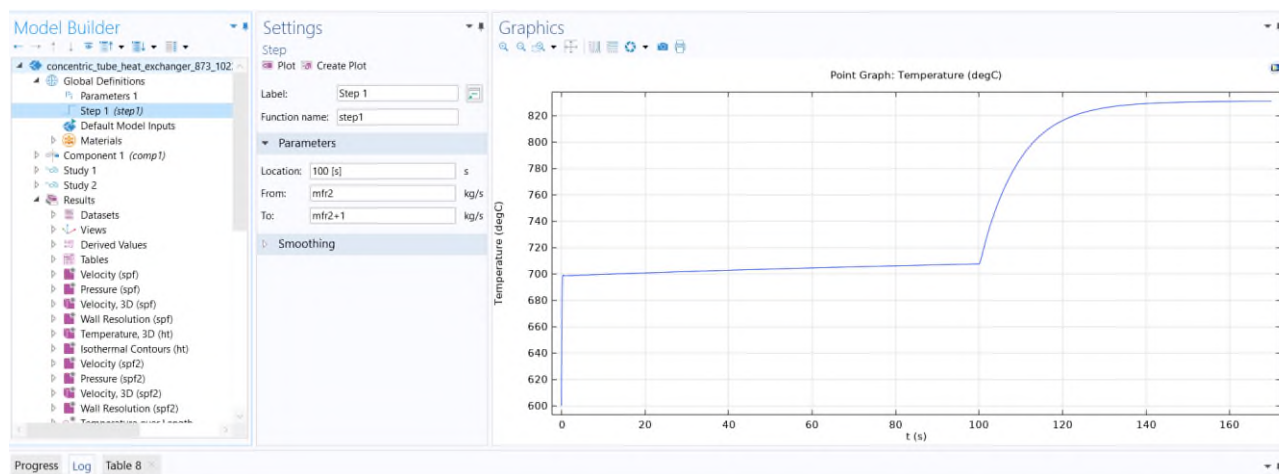


Рис. 2. Вплив витрати на температуру – динамічний режим

Отримана за каналом керування перехідна характеристика підлягає апроксимації у формі дробово-раціональної передавальної функції, що є основою для подальшого параметричного синтезу системи.

Запропонована методика керування реактором ТРМ має універсальний характер і може бути адаптована для автоматизації інших типів каталітичних реакторів у хімічній промисловості.

1. Yablonsky G.S., Branco D.P., Marin G.B., Constales D. Conservatively Perturbed Equilibrium (CPE) in chemical kinetics. *Chemical Engineering Science*. 2019. Vol. 196. P. 384-390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.11.010>.

2. Yablonsky G.S., Constales D., Marin G.B. Equilibrium relationships for non-equilibrium chemical dependencies *Chemical Engineering Science*. 2011. Vol. 66. P. 111–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.10.014>.

3. Trishch V.R., Beznosyk Yu.O., Bugaieva L.M., Yablonsky G.S. Reactive chemical systems with equilibrium kinetic relations. *Organization of scientific research in modern conditions '2020: Conference proceedings International scientific conference May, 14-15, 2020. USA, Seattle: KindleDP, 2020. P. 167-172. DOI: <https://doi.org/10.30888/979-865-1656-02-8.0>*.

4. Trishch, Vitaliy R., Vilboi Mykhailo O., Yablonsky, Gregory S. and Kovaliuk Dmytro O. "Hydrogen and CO Over-Equilibria in Catalytic Reactions of Methane Reforming" *Journal of Catalysts*, vol.14, no. 11, 2024, P. 773. <https://doi.org/10.3390/catal14110773>.

ВПЛИВ КРИТЕРІЮ ОПТИМІЗАЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА БАЗІ ЗВУКОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

Савула А. А., Коротинський А. П.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, aasavula@gmail.com

Ефективна робота сучасних автоматизованих систем керування (АСК) безпосередньо залежить від поточного техніко-експлуатаційного стану обладнання. Такі явища, як зношення підшипників, перевантаження конвеєра або зміна властивостей сировини, спричиняють зміни в технологічному процесі, які неминуче відображаються на акустичних характеристиках обладнання.

Для моніторингу цих змін пропонується використання методів звукової дефектоскопії. Аналіз звуку дозволяє в реальному часі виявляти аномальні режими роботи, які можуть бути як новими технологічними станами, так і передумовами аварійних ситуацій.

Виявлення такого режиму сигналізує про необхідність переналаштування системи керування. Для цього пропонується використати підходи екстремального керування: блок звукової дефектоскопії виконує роль детектора, що фіксує відхилення від номінального режиму та ідентифікує тригер для запуску алгоритму оптимізації.

Ключовим фактором успішності такої оптимізації є обраний критерій оптимізації, який визначає, до якого усталеного стану і яким чином система намагатиметься привести об'єкт керування. Відтак, необхідно дослідити вплив критерію оптимізації на швидкодію, точність та стійкість екстремальної системи керування на основі звукової дефектоскопії.

У даній роботі проведено дослідження ефективності критеріїв: *Integral of Squared Error (ISE)*, *Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE)*, *Mean Squared Error (MSE)* та *Integral of Time-weighted Squared Error (ITSE)*.

На рис. 1 наведено зміну керувального сигналу після виявлення дефекту в процесі експлуатації промислового обладнання. Можна побачити, що критерії *ITAE* та *ITSE* викликають значні коливання керувального сигналу, а *ISE* та *MSE* працюють більш плавно, що забезпечує більш плавне керування. Отримані результати свідчать про підвищену чутливість критеріїв *ITAE* та *ITSE* до динамічної похибки, що призводить до агресивної реакції регулятора. Така поведінка може викликати додаткові навантаження на виконавчі механізми та зменшувати ресурс обладнання.

На рис. 2 зображено процес виходу системи на усталений рівень. При виході на усталений рівень критерії *ITAE* та *ITSE* показують значно нижчий рівень перерегулювання (10 % та 12 % відповідно) та швидкий вихід на усталений рівень (38 с), критерій *ISE* виходить на усталений рівень за 48 с та має 18 % перерегулювання, а критерій *MSE* має найвищий рівень перерегулювання, а саме – 25 % та найдовший час виходу на усталений рівень більше 60 с. Це свідчить про те, що критерії, які враховують часову вагу похибки, ефективніше мінімізують тривалі відхилення та забезпечують швидке затухання перехідного процесу.

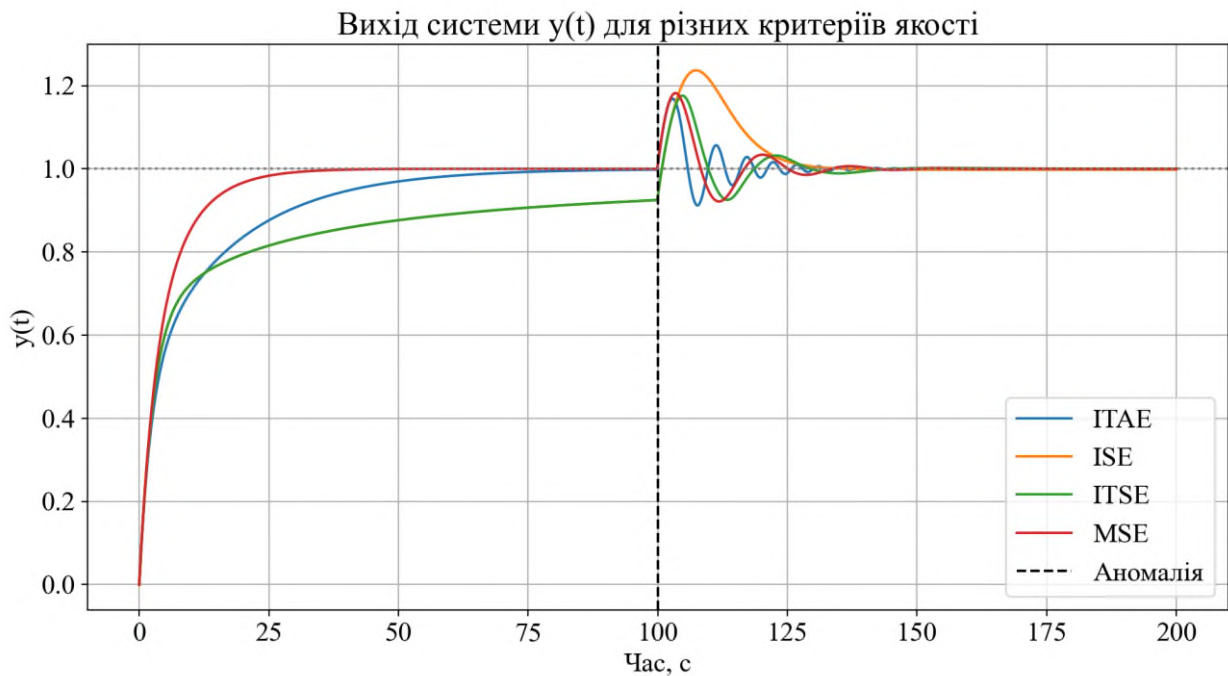


Рис. 1. Графік зміни керування застосуванні різних критеріїв оптимізації

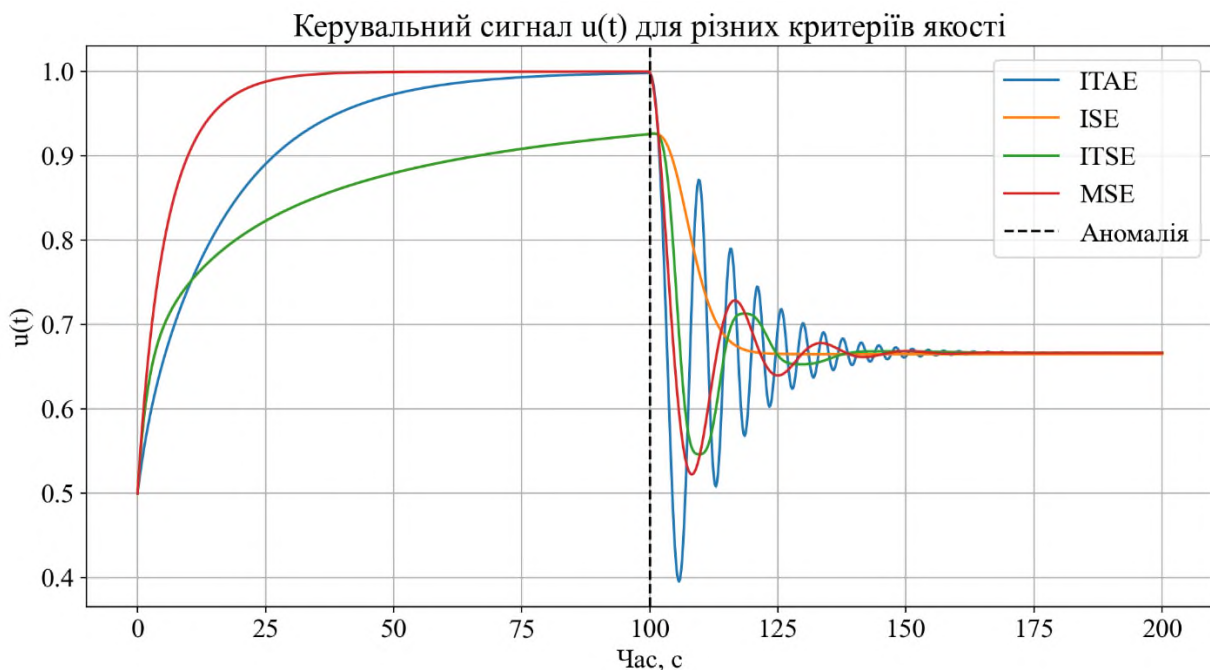


Рис. 2. Графік зміни виходу на усталений рівень застосуванні різних критеріїв оптимізації

У результати бачимо, що хоча такі критерії як *ITAE* та *ITSE* мають значно кращі показники при виході системи на усталений рівень, але їх значні коливання при генерації керувального впливу роблять неможливим їх застосування у системі керування. При порівнянні критеріїв *ISE* та *MSE*, отримуємо, що критерій *ISE* має нижчий рівень перерегулювання та час виходу системи на усталений рівень. Таким чином при синтезі екстремальних систем керування на базі звукової дефектоскопії доцільно використовувати такий критерій якості як *ISE*.

СТВОРЕННЯ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОЇ СХЕМИ ХОЛОДИЛЬНИКА-КОНДЕНСАТОРА

Пахнюк А. О., Запорожець Ю. А.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, anastasiapakhniuk23@gmail.com

В процесі виробництва метанолу одним із ключових апаратів у технологічному процесі є холодильник-конденсатор. Його функціональне призначення полягає в забезпеченні ефективного відведення тепла від парогазової суміші, що виходить із реактора синтезу, а також у створенні умов для часткової або повної конденсації метанолу. Саме на цьому етапі формується рідка фаза продукту, яка надалі направляється до сепараційного обладнання для відокремлення від газової складової. Таким чином, ефективність роботи холодильника-конденсатора безпосередньо впливає на ступінь вилучення метанолу, енергетичні витрати процесу та стабільність функціонування всієї технологічної установки.

Робота холодильника-конденсатора відбувається в умовах змінних технологічних параметрів, що зумовлено коливаннями навантаження реактора, змінами складу синтез-газу, а також впливом зовнішніх факторів, таких як температура охолоджувального середовища або режими роботи допоміжного обладнання. Вхідна парогазова суміш може характеризуватися змінними значеннями температури, тиску, витрати та концентрації метанолу, що ускладнює забезпечення стабільного режиму конденсації. У зв'язку з цим виникає необхідність у впровадженні ефективної системи автоматичного керування, здатної оперативно реагувати на збурення та підтримувати оптимальні умови тепло- і масообміну.

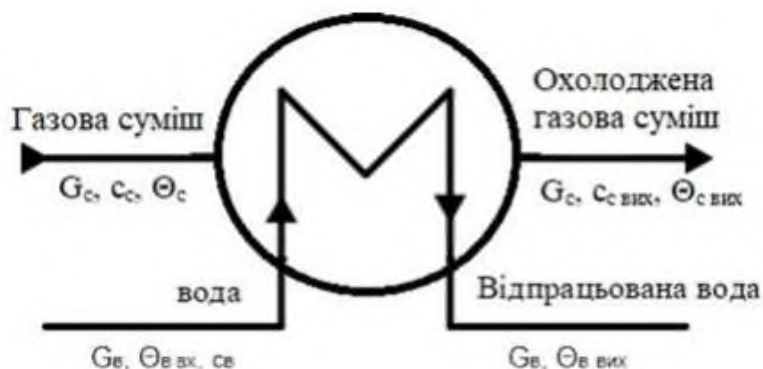
Основним завданням холодильника-конденсатора є зниження температури парогазової суміші до рівня, за якого відбувається інтенсивна конденсація метанолу. Це досягається шляхом передачі тепла від гарячого потоку до охолоджувального агента (зазвичай води або іншого теплоносія) через теплопередавальну поверхню апарата. При цьому важливе значення мають такі параметри, як коефіцієнт теплопередачі, площа теплообмінної поверхні, швидкість руху середовищ та різниця температур між ними. Недостатнє охолодження призводить до втрат цільового продукту з газовою фазою, тоді як надмірне охолодження може спричинити перевитрати енергії та небажані гідравлічні явища.

Для забезпечення ефективної та надійної роботи холодильника-конденсатора необхідно здійснювати контроль і регулювання ряду технологічних параметрів. До основних з них належать температура та тиск парогазової суміші на вході та виході апарата, витрата охолоджувального агента, рівень сконденсованої рідини, а також ступінь конденсації метанолу [1]. Врахування цих параметрів дозволяє не лише підтримувати заданий режим роботи, але й своєчасно виявляти відхилення, що можуть призвести до порушення технологічного процесу.

У цьому контексті важливим етапом є розроблення структурно-параметричної схеми холодильника-конденсатора як об'єкта автоматизації. Така схема повинна відображати взаємозв'язки між вхідними та вихідними параметрами про-

цесу, керуючими впливами та збурюючими факторами. Вона включає визначення основних каналів регулювання, вибір контрольованих і керованих величин, а також ідентифікацію параметрів, що характеризують динамічні властивості об'єкта.

Структурно параметрична схема холодильника-конденсатора. Структурно-параметрична схема дозволяє формалізувати процес теплообміну та конденсації у вигляді математичної моделі, яка може бути використана для аналізу та синтезу систем автоматичного керування. Зокрема, вона дає змогу визначити передавальні функції окремих каналів, оцінити вплив збурень на вихідні параметри та обґрунтувати вибір регуляторів. Це є необхідною передумовою для створення ефективною системи автоматизації, яка забезпечить стабільність роботи холодильника-конденсатора, підвищення якості кінцевого продукту та оптимізацію енергетичних витрат виробництва метанолу в цілому.



Структурно параметрична схема холодильника-конденсатора

G_c – витрата газової суміші; $\Theta_{cвих}$ – температура газової суміші на виході; Θ_c – температура суміші на вході; c_c – питома теплоємність газової суміші G_b – витрата води; $\Theta_{bвх}$ – температура від працюваної води; c_b – питома теплоємність води; $c_{cвих}$ – питома теплоємність газової суміші; $\Theta_{bвих}$ – температура відпрацьованої води;

Для математичного опису впливу основних вихідних параметрів на утворення охолоджувальної газової суміші використовується спрощена форма рівняння теплового балансу [2]:

$$G_c c_c \Theta_{cвих} + G_b c_b \Theta_{bвих} = G_c c_{cвих} \Theta_{cвих} - G_k r_k + G_b c_b \Theta_{bвих}.$$

На основі рівняння будується графік залежності «витрата води – температура охолодженої суміші».

1. Математичне моделювання процесів і систем [Електронний ресурс] : Навч. посіб. / А. І. Жученко, Л. Р. Ладієва, М. С. Піргач, Я. Ю. Жураковський; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,6 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 351 с.

2. Математичне моделювання систем і процесів [Текст]: Методичні вказівки до виконання практичних робіт для студентів спеціальностей: «Обладнання лісового комплексу»; «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів»; «Машини і технології пакування» / Уклад.: М. С. Піргач, Я. Ю. Жураковський. К.: НТУУ «КПІ», 2014. 42 с.

АЛГОРИТМ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ВИХІДНИМИ СИГНАЛАМИ БАГАТОВИМІРНОГО ТЕПЛОВОГО ОБ'ЄКТА

Федотова М. О., Трушаков Д. В. Заворуєв Р. С., Голик О. П., Дідик О. К.
 Центральноукраїнський національний технічний університет, Skrynnik_2002@ukr.net

Відомо, що висоту дисперсного матеріалу на каскадах в сушильній камері зерносушарки можливо оцінити за рахунок використання наперед відомого зв'язку зміни кінцевої вологості матеріалу із зміною висоти киплячого шару на кожному з каскадів. Для цього застосуємо відомий алгоритм синтезу оптимальних структур і параметрів матриці передаточних функцій спостерігача, наведений в монографії [1].

Необхідно визначити таку структуру і параметри матриці передаточних функцій (МПФ) системи спостереження F_k , яка б, вимірюючи лише зміну кінцевої вологості матеріалу, давала оцінку зміни висоти киплячого шару з мінімальною дисперсією похибки на k -тому каскаді. Критерій точності e^k_0 оцінювання вихідних сигналів для k -того каскаду системою спостереження виражається через дисперсію похибки оцінювання і описується так:

$$e^k_0 = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{j\infty} \text{tr} \left((S^k_{\varepsilon\varepsilon})' R_k \right) ds, \tag{1}$$

де $(S^k_{\varepsilon\varepsilon})'$ – транспонована матриця спектральних щільностей (МСЩ) похибок оцінювання вихідних сигналів ЗКШ, що розраховується за формулами

$$\begin{aligned} (S^k_{\varepsilon\varepsilon})' &= F_k (S^k_{\psi 0 \psi 0})' F_{k*} - F_k (S^k_{\psi \psi 0})' (P_{k*})^{-1} - (P_k)^{-1} (S^k_{\psi 0 \psi})' F_k \\ &+ (P_k)^{-1} (S^k_{\psi \psi})' (P_{k*})^{-1}, \end{aligned} \tag{2}$$

$$(S^k_{\psi 0 \psi 0})' = K (P_k)^{-1} (S^k_{\psi \psi})' (P_{k*})^{-1} K_* + S_{\varphi\varphi}', \tag{3}$$

$$(S^k_{\psi \psi 0})' = K (P_k)^{-1} (S^k_{\psi \psi})', \tag{4}$$

$$(S^k_{\psi 0 \psi})' = (S^k_{\psi \psi})' (P_{k*})^{-1} K_*. \tag{5}$$

Відповідно обраному методу [1], МПФ оптимальної системи спостереження може бути відшукана як:

$$F_k = -G_k^{-1} (T_0 + T_+)_k D_k^{-1}, \tag{6}$$

де G_k – результат лівосторонньої [2] факторизації матриці

$$G_k^* G_k = R_k, \tag{7}$$

D_k – результат правосторонньої [2] факторизації матриці

$$\left(S^k_{\psi 0 \psi 0}\right)' = D_k D_{k*}; \quad (8)$$

$(T_0 + T_+)_k$ – результат сепарації матриці

$$T_k = (T_0 + T_+)_k + T_{k-} = -G_k P_k^{-1} \left(S^k_{\psi 0 \psi}\right)' D_{k*}^{-1}. \quad (9)$$

Згідно з описаною методикою можна сформулювати наступну технологію визначення структури і параметрів МПФ спостерігача F_k , який, вимірюючи кінцеву вологість на виході з сушарки, дає оцінку висоти киплячого шару на k -тому каскаді в такій послідовності.

1. Формуємо матрицю $\left(S^k_{\psi 0 \psi 0}\right)'$ згідно з (3).
2. Факторизуємо матрицю $\left(S^k_{\psi 0 \psi 0}\right)'$ і визначаємо матрицю D_k (8).
3. Визначаємо матрицю T_k , використовуючи співвідношення (9).
4. Сепаруємо матрицю T_k і отримуємо $(T_0 + T_+)_k$.
5. Визначимо структуру і параметри МПФ спостерігача для k -того каскаду F_k , використовуючи формулу (6).
6. Виконуємо алгоритм для всіх каскадів об'єкту, повторюючи п. 1–п. 5.
7. Вивести загальну для всіх каскадів структуру системи спостереження F_k , а зміну коефіцієнтів звести до таблиці за прикладом

Каскад	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№n
коефіцієнт							
k_{11}							

8. За формулою (1) виконаємо аналіз якості оцінювання зміни висоти киплячого шару на кожному з семи каскадів по значенню вологості на виході із сушарки.
9. Порівняти отримані похибки оцінювання вологості і висоти киплячого шару по каскадах у вигляді таблиці.
10. Обрати каскад, на якому оцінка зміни висоти киплячого шару мінімальна. Для визначеного каскаду розрахуємо оптимальну структуру і параметри системи спостереження F_k .
11. Спростимо структуру отриманої моделі спостерігача F_k , апроксимувавши його графіки дробово-раціональними функціями комплексного аргументу $s = j\omega$.

Наведена методика може бути використана для одного з етапів динамічного проектування – синтезу системи спостереження при неповних вимірюваннях вихідних сигналів зерносушарки з киплячим шаром.

1. Азарсков В. Н., Блохин Л. Н., Житецкий Л. С. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации : монография. К.: НАУ, 2006. 438 с.
 Davis M. C. Factoring the spectral matrix // IEEE Trans. Automat. Control 8 (1963).

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІН СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ ГЕНЕРАТИВНИХ МОДЕЛЕЙ

Носов А. О., Коржик М. В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, korzhyk@kpi.ua

Мобільні роботи у виробничих середовищах стикаються з динамічними змінами оточення: переміщенням операторів, рухом інших роботів та появою тимчасових перешкод. Традиційні реактивні алгоритми навігації обробляють зміни постфактум, що призводить до екстрених гальмувань, неоптимальних траєкторій та підвищеного ризику зіткнень. Актуальною є розробка систем, здатних прогнозувати майбутні стани середовища та завчасно коригувати поведінку робота.

Нявні підходи до прогнозування динаміки середовища можна розділити на дві групи. Детерміністичні методи (фільтри Калмана, лінійна екстраполяція) забезпечують швидкий прогноз для одного сценарію, але не враховують багатоваріантність розвитку подій: оператор може піти ліворуч або праворуч з приблизно рівними ймовірностями. Ймовірнісні методи (гаусові процеси, суміші гаусіан) дозволяють моделювати невизначеність, але мають обмежену здатність захоплювати складні нелінійні залежності у довгих часових послідовностях [1]. Генеративні моделі, зокрема варіаційні автоенкодері (*VAE*) та трансформери, потенційно поєднують переваги обох підходів, але їх систематичне застосування для прогнозування виробничого середовища залишається недослідженим.

Запропоновано архітектуру прогнозування змін середовища, що поєднує *VAE* для побудови компактного латентного представлення стану оточення з трансформерним блоком для авторегресивної генерації послідовності майбутніх станів. На відміну від існуючих підходів, де прогнозується одна детерміністична траєкторія, запропонована модель генерує розподіл ймовірностей над множиною можливих сценаріїв, що дозволяє планувальнику робота обирати дії, робастні до невизначеності.

Прогнозований розподіл майбутніх станів середовища формалізується як умовний генеративний процес:

$$\hat{P}(s_{t+1:t+H} | z_t, \theta) = \prod_{k=1}^H p_{\theta}(s_{t+k} | z_t, s_{t+1:t+k-1}), \quad (1)$$

де $z_t = \text{Enc}(o_{1:t})$ – латентне представлення, отримане енкودером *VAE* на основі історії спостережень від сенсорів (лідари, камери); H – горизонт прогнозування (5–10 с); θ – параметри моделі.

Енкودер *VAE* стискає високорозмірні спостереження у компактний латентний вектор, а апіорний розподіл *VAE* регуляризує простір, запобігаючи фізично неправдоподібним прогнозам. Трансформерний декодер розгортає прогноз авторегресивно: кожен наступний стан генерується з урахуванням усіх попередніх через механізм самоуваги (*self-attention*), що дозволяє захоплювати довгострокові залежності у поведінці динамічних об'єктів [1]. Згенеровані сценарії передаються модулю планування руху. На відміну від однокритеріального підходу, пла-

нувальник оптимізує траєкторію робота за трьома критеріями одночасно: мінімізація часу виконання завдання, забезпечення безпечної дистанції до рухомих об'єктів та зменшення енерговитрат.

Методи багатокритеріального навчання з підкріпленням [2] дозволяють знаходити збалансовані стратегії, де робот не жертвує безпекою заради швидкості. Множинність згенерованих сценаріїв забезпечує робастність: планувальник обирає дії, оптимальні для найбільш імовірних варіантів розвитку подій [3]. Для забезпечення промислової надійності запропоновано дворівневу реалізацію: генеративна модель виконується на *edge*-сервері з *GPU*, тоді як базові функції безпеки (аварійна зупинка, обмеження швидкості) реалізуються на програмованому логічному контролері (ПЛК). ПЛК гарантує детерміновану реакцію на критичні події незалежно від стану AI-модуля, що є обов'язковою вимогою стандартів промислової безпеки [4]. Для подолання розриву між симуляцією та реальністю (*sim-to-real gap*) пропонується офлайн-навчання моделі на даних із симулятора з рандомізацією параметрів середовища [5], з подальшим онлайн-донавчанням на реальних даних.

Очікувані результати: зниження кількості екстрених гальмувань на 40–60 % порівняно з реактивними алгоритмами за рахунок випереджувального перепланування траєкторії; покращення каліброваності прогнозів (>90 % реальних траєкторій потрапляють у прогнозований довірчий інтервал); забезпечення часу інференсу генеративної моделі <50 мс на *edge-GPU (NVIDIA Jetson Orin)*, що дозволяє працювати в реальному часі з частотою перепланування 10–20 Гц.

Перспективи досліджень включають: інтеграцію з конформним прогнозуванням для отримання гарантованих довірчих інтервалів без припущень щодо розподілів [6]; розвиток методів онлайн-адаптації генеративних моделей для нових виробничих умов без повного перенавчання; масштабування на флоти роботів із обміном прогнозами через федеративне навчання.

1. Kotb M., Weber C., Hafez M. B., Wermter S., 2024. QT-TDM: Planning With Transformer Dynamics Model and Autoregressive Q-Learning. arXiv preprint arXiv:2407.18841.

2. Roijers, D.M. та ін., 2022. A practical guide to multi-objective reinforcement learning and planning. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 36, Article 95.

3. Wray, K.H., Witwicki, S.J. та Zilberstein, S., 2017. Multi-Objective POMDPs for Robust Autonomy. *Proc. IJCAI*.

4. Taranta, D. та ін., 2021. An Autonomous Mobile Robot Navigation Architecture for Dynamic Intralogistics. *Proc. IEEE INDIN. IEEE*.

5. Peng, X.B., Andrychowicz, M., Zaremba, W. та Abbeel, P., 2018. Sim-to-Real Transfer of Robotic Control with Dynamics Randomization. *Proc. IEEE ICRA*, с. 3803–3810.

6. Lindemann, L., Cleaveland, M., Shim, G. та Pappas, G.J., 2023. Safe Planning in Dynamic Environments Using Conformal Prediction. *IEEE RA-L*, 8(8), с. 5116–5123.

ВРАЗЛИВІСТЬ ПРОГРАМНИХ ДАТЧИКІВ КОНТУРУ ПОДРІБНЕННЯ ДО КАЛІБРУВАЛЬНОГО ДРЕЙФУ

Аблець А. В., Тронь В. В.

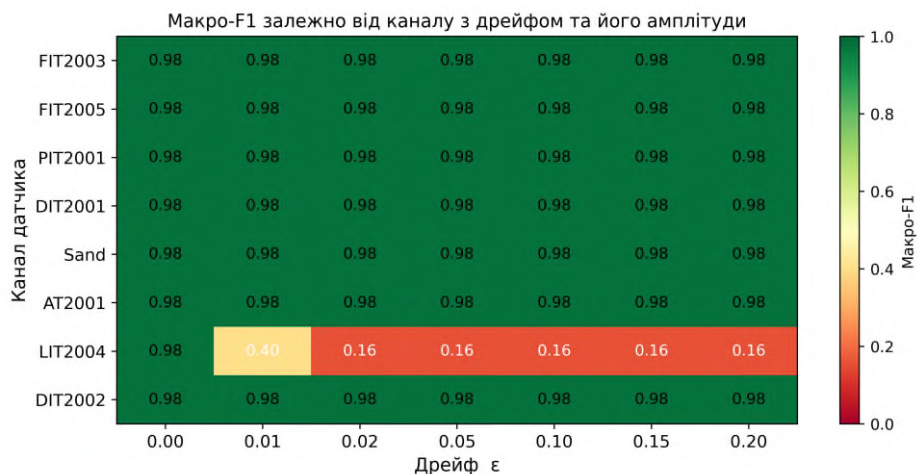
Криворізький національний університет, ablets.a.v@knu.edu.ua

У контурах подрібнення та класифікації критичні показники – тонкість подрібнення, маса завантаження млина, циркуляційне навантаження – часто недоступні для прямого вимірювання. Тому застосовують моделі програмного датчика (soft sensor) [1], побудовані за історичними даними SCADA. На тестових вибірках вони стабільно дають макро-F1 понад 0,98. Проте у виробничому контурі після планового калібрування датчик може зміститися на 1 %, і цього вже достатньо, щоб модель з лабораторною точністю 98 % різко втратила працездатність [2].

Розглянемо цю ситуацію на відкритому наборі "Dataset on ore grinding and grading process" [3] – реальних вимірюваннях з промислової ділянки мокрого подрібнення. Він містить вісім каналів SCADA (витрата руди, тиск перед гідроциклонами, рівень у зумпфі LIT2004, витрата й густина зливу, циркуляційний пісок, крупність, концентрація пульпи) та три класи режимів: простій, грубий помол, оптимальний помол.

За умови однакового розподілу навчальної і тестової вибірок лінійна логістична регресія, градієнтний бустинг, багатошаровий перцептрон, а також моделі доменної адаптації CORAL (Correlation Alignment) [4] та DANN (Domain-Adversarial Neural Network) дають близьку якість – макро-F1 близько 0,98. Далі вводимо мультиплікативний дрейф калібрування: значення кожного каналу множимо на $(1 + \varepsilon)$. Уже за $\varepsilon = 1\%$ якість логістичної регресії різко падає (до $\approx 0,40$), а за $\varepsilon = 2\%$ – з 0,98 до 0,16. Модель фактично зводиться до тривіального класифікатора і передбачає лише один клас – це прояв shortcut learning, коли модель спирається на випадкові артефакти даних замість справжніх ознак класу [5].

Окремо перевірено дрейф кожного каналу. Вразливим виявився лише один – LIT2004 (рівень у зумпфі). Решта сім каналів витримують навіть 20 % дрейфу без помітного погіршення якості (рисунок).



Вплив калібрувального дрейфу на макро-F1 за різними каналами та рівнями ε .
Катастрофічне падіння якості спричиняє лише дрейф каналу LIT2004

Це пояснюється тим, що якщо вихідний сигнал x помножити на $(1 + \varepsilon)$, то у стандартизованому просторі зсув дорівнює $\varepsilon - \mu / \sigma$. Рівень у зумпфі LIT2004 коливається у вузькому діапазоні (середнє 4,19 м, стандартне відхилення 0,012 м), тому $\mu / \sigma \approx 347$. Дрейф 1 % у сирих даних після стандартизації дає зсув $3,47\sigma$, що значно перевищує типові межі рішень лінійного класифікатора.

Звідси впливає діагностична метрика – індекс вразливості $VI = \mu / \sigma$. Він показує коефіцієнт підсилення дрейфу після стандартизації. Класичні методи відбору ознак (VarianceThreshold, взаємна інформація) можуть відкинути такий канал через низьку мінливість або інформативність, однак саме про чутливість до дрейфу вони не сигналізують. У розглянутому наборі другий за величиною VI становив лише 3,1 проти 347 у LIT2004, тому поріг $VI > 50$ надійно виокремлює небезпечні канали ще на етапі відбору ознак.

Порівняно п'ять стратегій відновлення стійкості: видалення проблемної ознаки; доменна адаптація CORAL; онлайн-рецентрування пакетів за локальним середнім; ансамбль дерев рішень (HistGradientBoosting); додавання гаусівського шуму при навчанні. Перші три повністю відновлюють макро-F1 $\geq 0,98$ навіть за дрейфу 20 %. Ансамбль дерев зберігає прийнятну точність приблизно до 10 %. Шумова аугментація виявляється неефективною: шум додається у стандартизованому просторі, тоді як дрейф підсилюється ще до стандартизації.

На практиці це означає, що перед запуском моделі програмного датчика кожену вхідну ознаку варто перевіряти за VI , а у виробничий контур закладати рецентрування або CORAL. Інакше навіть непомітне оператору відхилення калібрування здатне призвести до повної відмови моделі. Наступний крок – перенесення підходу на регресійні програмні датчики та задачі MPC-керування (Model Predictive Control).

1. Kadlec P., Gabrys B., Strandt S. Data-driven Soft Sensors in the process industry // Computers & Chemical Engineering. 2009. Vol. 33, № 4. P. 795-814. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2008.12.012.

2. Vergara A., Vembu S., Ayhan T. et al. Chemical gas sensor drift compensation using classifier ensembles // Sensors and Actuators B: Chemical. 2012. Vol. 166-167. P. 320-329. DOI: 10.1016/j.snb.2012.01.074.

3. Dataset on ore grinding and grading process [Електронний ресурс] // Mendeley Data, V2. – 2019. – DOI: 10.17632/hgsf7bwkrv.2.

4. Sun B., Saenko K. Deep CORAL: Correlation Alignment for Deep Domain Adaptation // Computer Vision – ECCV 2016 Workshops. Cham: Springer, 2016. P. 443-450. DOI: 10.1007/978-3-319-49409-8_35.

5. Geirhos R., Jacobsen J.-H., Michaelis C. et al. Shortcut learning in deep neural networks // Nature Machine Intelligence. 2020. Vol. 2, № 11. P. 665-673. DOI: 10.1038/s42256-020-00257-z.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ СТАТИЧНОГО РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОЗНЕВОДНЮВАЧА НАФТИ ЗА ДОСЛІДНИМИ ДАНИМИ

Путятін Р. О., Цапар В. С.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, r.putyatin-ktpza24@iit.kpi.ua

Одна з важливих нерозв'язаних задач процесу електричного зневоднювання нафти – оптимізація технологічних параметрів у статичному режимі: витрати деемульгатора, температури й витрати нафтової емульсії, напруженості поля зневоднювача, початкового вмісту води – з урахуванням собівартості процесу.

Щоб її розв'язати, потрібно мати статичну характеристику зневоднювача за відповідними каналами. Труднощі з урахуванням нелінійних явищ у математичній моделі процесу (вервичкування й розрив краплин, неідеальність злиття тощо) спонукають ідентифікувати дослідні дані.

Ми використали дані про перехідні процеси в промисловому зневоднювачі зі статті [1], оброблені в роботі [2]. Кореляція входів із виходом найбільша за таких затримок у каналах: температура емульсії $T - 0$, її витрата $F - 3$ кроки, напруга між електродами зневоднювача $U - 0$ (1 крок – 120 секунд). Зіставивши відповідні значення входів і виходу зневоднювача, отримали точки статичної характеристики – залежності кінцевого вмісту води в нафті w від T , F та U .

Витрату емульсії в задачі оптимізації доцільно вважати незмінною, адже вона впливає на продуктивність усього НПЗ. Величини T й U ми взяли як змінні, за якими й слід оптимізувати статичний режим, адже лівова частка енергетичних і грошових витрат на зневоднювання припадає саме на них. Тож зідентифікована статична характеристика буде функцією трьох аргументів, яку зручно унаочнити як множину поверхонь в системі координат (T, U, w) за різних значень F .

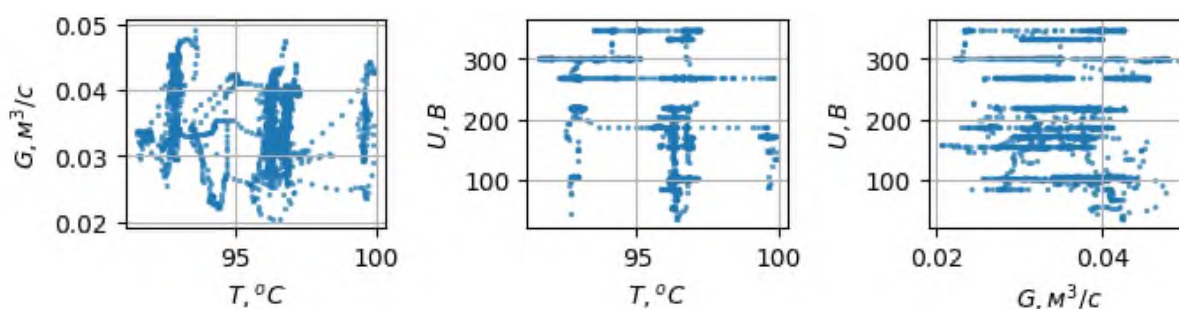


Рис. 1. Проекції хмари точок дослідних даних на осі T , F й U

На Рис. 1 наведено розподіл дослідних точок на різні пари осей-входів об'єкта. Точки розміщені з великими «прогалинами», тож дерева рішень, випадкові ліси й інші моделі, не придатні для екстраполяції, не підходять. Також, входи мають доволі малу кореляцію з виходом (менш як 0,7 для U й менш як 0,4 для T й F), тож лінійні моделі також не будуть дієвими. Ми використали баєсівську нейронну мережу з повнозв'язними шарами й лінійним випрямлячем (ReLU). Кожній точці вибірки присвоїли вагу – обернену величину до щільності точок, обчисленої за ядром Гаусса з гаусівським ядром.

Щоб урахувати нерівномірний розподіл даних, під час розв'язання задачі оптимізації слід обмежити область пошуку. Для цього слід знайти область застосовності. Ми пропонуємо використати перетин опуклої оболонки вибірки й частини простору, відокремленого поверхнею зі сталим стандартним відхилом σ , передбаченим нашою мережею. На Рис. 2 зображено передбачені нейромережею значення w (сині й зелені лінії) за різних значень F , а також зрізи опуклої оболонки вибірки (червоні) та лінії рівня для σ (чорні).

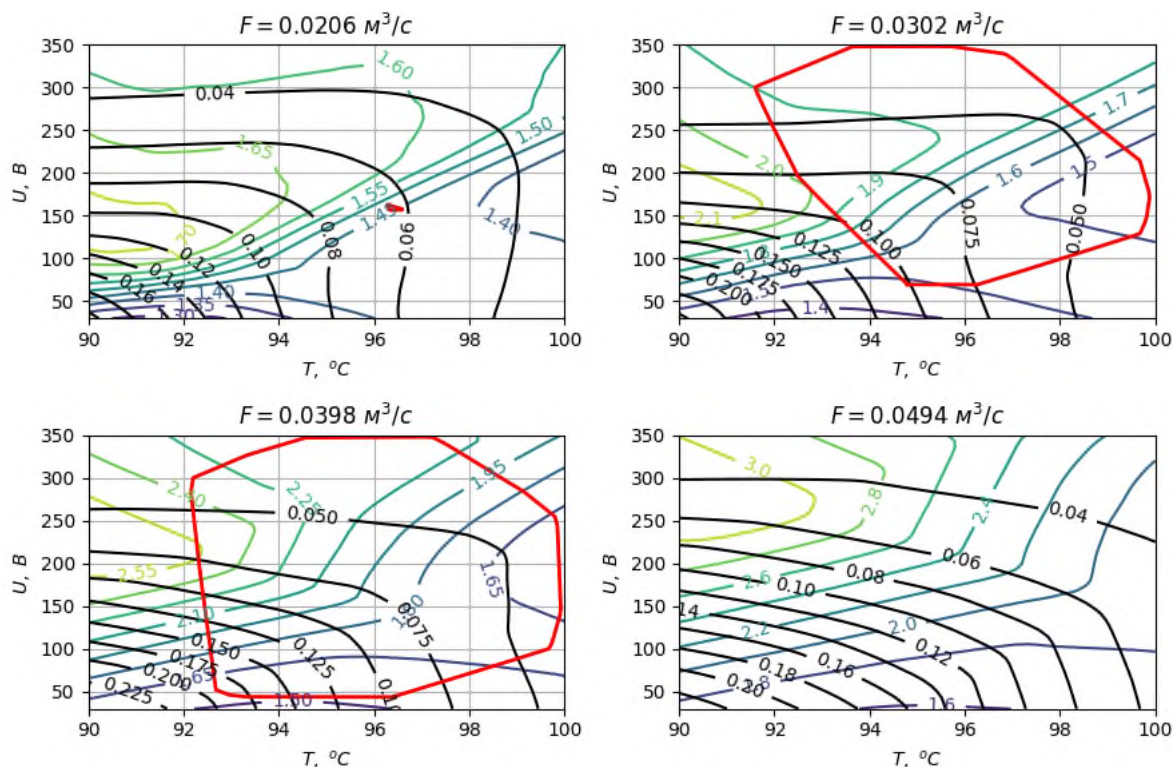


Рис. 2. Статична характеристика й межі можливих областей застосовності

Візьмімо, наприклад, $\sigma = 0,06$ % мас. (води в нафті). Тоді на двох крайніх графіках припустимих областей нема, а на інших двох залишається близько половини від областей, відітнутих у дослідженому проміжку лише однією з кривих. У цих ділянках передбачення моделі можна вважати достатньо надійними (за потреби можна взяти лінію, що відповідає меншому значенню σ).

За допомогою запропонованого підходу можна отримувати дослідну статичну характеристику на основі нерівномірно розподілених даних та визначати область її застосовності. Це – основа для подальшої оптимізації статички процесу.

1. Perez H. D., Grandas G. G., Perez-Rodriguez H. Applied Advanced Control Systems for Electrostatic Dehydrators in the Upstream Oil Industry. *SPE Latin American and Caribbean Health, Safety, Environment and Sustainability Conference*. Bogotá, Colombia. 2015. URL: <https://doi.org/10.2118/174149-ms> (дата звернення: 09.04.2026).

2. Путятін Р. О. Енергоощадливе керування технологійним процесом зневоднювання та знесолювання нафти: магістерська дисертація. Київ, 2025. 123 с. URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28587.91682> (дата звернення: 04.04.2026).

ЗАДАЧІ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ВАПНЯКОВО-АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ В РЕЖИМІ НОРМАЛЬНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Бондаренко А. О., Тюріна Є. О.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, forkpibondarenko@gmail.com

Вапняково-аміачна селітра (ВАС) – це азотне мінеральне добриво, яке застосовують у сільському господарстві для підвищення врожайності та покращення живлення рослин при їх вирощуванні. Використання ВАС ефективне, зокрема, на кислих ґрунтах. Завдяки високій розчинності у воді та наявності поживних речовин, це добриво забезпечує оптимальні умови для росту рослин*. Таким чином, актуальним є впровадження системи автоматизації виробництва вапняково-аміачної селітри, яка забезпечить отримання продукту належної якості.

Метою дослідження є формування комплексу задач керування, які забезпечать підвищення економічної ефективності виробництва з дотриманням вимог до якості продукту.

Розглянемо виробництво вапняково-аміачної селітри, структурну схему якого наведено на рисунку.

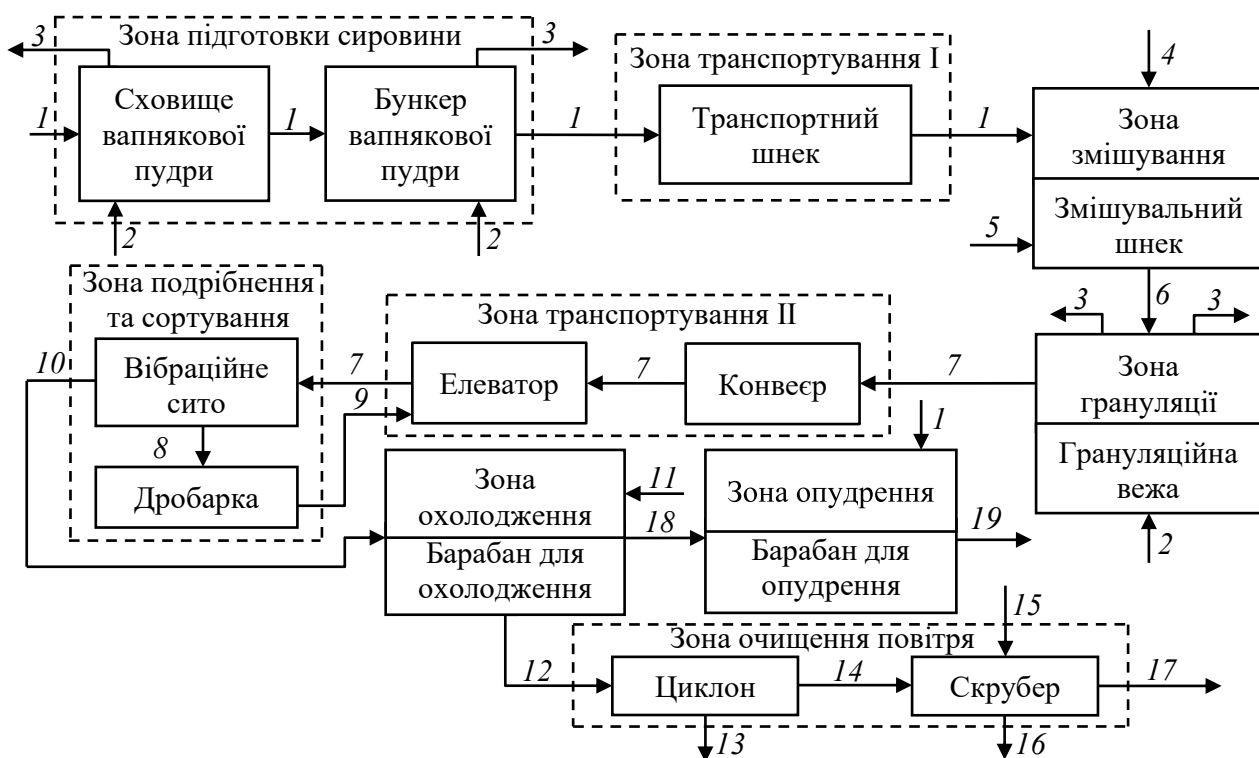
Зона підготовки та зберігання сировини. В цій зоні відбувається заповнення сховища і бункера подрібненим вапняком – вапняковою пудрою (борошном). В цих апаратах передбачено системи вентиляції для захисту від вологи й утворення пилу. Задачею керування є зменшення вологості вапнякового борошна шляхом відведення зі сховища і бункера теплого повітря.

Зони транспортування (ЗТ) I і II. У ЗТ I подрібнений вапняк подають пневмотранспортом у грануляційну вежу. У ЗТ II неоднорідні гранули ВАС направляють послідовно через конвеєр та елеватор на вібраційні сита. Для цих етапів у межах дослідження немає потреби формувати задачі керування, оскільки ці процеси не впливають на якість продукту.

Зона змішування компонентів. Подрібнений вапняк змішують із плавом аміачної селітри при високих температурах для подальшого оброблення й отримання гранул. Задачами керування на цьому етапі є забезпечення температурного режиму в межах 125...135 °С для змішування компонентів, а також заданого співвідношення вказаних речовин.

Зона грануляції. В цій зоні відбувається формування гранул ВАС шляхом охолодження повітрям суміші аміачної селітри із подрібненим вапняком, яку направляють в апарат через гранулятор з утворенням крапель. Повітря подають протитечією, в результаті чого краплі застигають у вигляді твердих частинок – гранул. Отже, задачею керування є охолодження суміші аміачної селітри із подрібненим вапняком до температури 70...80 °С для отримання гранул ВАС.

* Технологія неорганічних речовин. Частина 3. Мінеральні добрива : навчальний посібник / Волошин М. Д., Черненко Я. М., Іванченко А. В., Олійник М. А. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2016. 354 с.



Структурна схема виробництва вапняково-аміачної селітри:

1 – подрібнений вапняк; 2 – атмосферне повітря; 3 – нагріте повітря; 4 – пара; 5 – плав аміачної селітри; 6 – суміш аміачної селітри з подрібненим вапняком; 7 – неоднорідні гранули ВАС; 8 – великі гранули ВАС; 9 – подрібнені гранули ВАС; 10 – гранули ВАС; 11 – охолоджене повітря; 12 – відпрацьоване повітря; 13 – пилю; 14 – частково очищене повітря; 15 – розчин аміачної селітри; 16 – розчин аміачної селітри з пилю; 17 – очищене повітря; 18 – охолоджені гранули ВАС; 19 – опудрені гранули ВАС

Зона подрібнення та сортування. Сформовані гранули після грануляційної вежі неоднорідні за складом, тому їх подають на вібраційні сита для видалення пилю, інших забруднювачів і великих частинок ВАС, які не відповідають заданим розмірам. Великі частинки ВАС, у свою чергу, подрібнюють у дробарці. Задачами керування цієї зони є забезпечення рівномірного розподілу гранул у вібраційних ситах та належного ступеня подрібнення.

Зона охолодження. Товарну фракцію продукту – гранули ВАС – охолоджують повітрям у барабані до 25...30 °С, отже задачею керування є стабілізація температури продукту в апараті.

Зона очищення повітря. Відпрацьоване повітря направляють з барабану для охолодження на послідовне очищення в циклоні та скрубєрі. У циклоні затримують до 70 % пилю, решту вилучають у скрубєрі, в який додають розчин аміачної селітри. Задачею керування є зменшення вмісту пилю у повітрі.

Зона опудрення. Для запобігання злежуваності гранул, їх додатково опудрюють вапняковим борошном. Отже, задачею керування є забезпечення заданого співвідношення витрат гранул ВАС та вапнякового борошна.

Проведений аналіз дозволяє створити структуру системи автоматизації процесу отримання ВАС, яка забезпечить дотримання вимог до якості продукту та підвищення економічної ефективності такого виробництва.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСУ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ БУФЕРНИХ СТІЧНИХ ВОД

Абрамова А. О., Полив'яний Д. М.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, alla_abramova@ukr.net

Одним із ключових етапів очищення стічних вод є процес нейтралізації, який передбачає регулювання хімічного складу шляхом додавання реагентів. Ефективність цього процесу значною мірою залежить від точності керування технологічними параметрами, зокрема рівнем рідини у ємності. Об'єктом дослідження є технологічна ємність для приготування або зберігання вапняного розчину (реагенту), схему наведено на рис. 1. Основним завданням керування [1] є стабілізація рівня рідини h у ємності шляхом зміни витрати потоку G на вході. Витрата на виході G визначається потребами технологічного процесу нейтралізації.

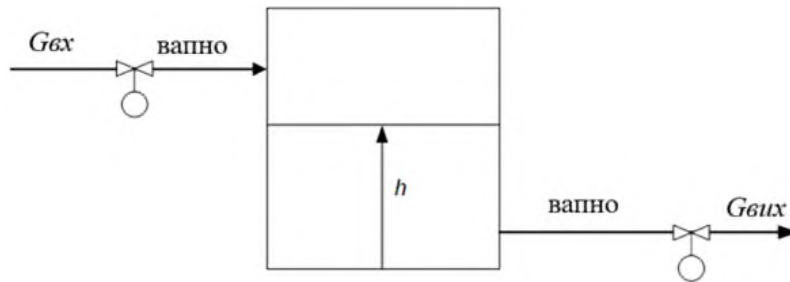


Рис. 1. Схема резервуара

З точки зору теорії автоматичного керування, даний об'єкт є одноємнісним об'єктом гідравлічного типу [2]. Для синтезу системи автоматичного регулювання необхідно отримати математичну модель, що описує динаміку зміни рівня $h(t)$ залежно від керувального впливу.

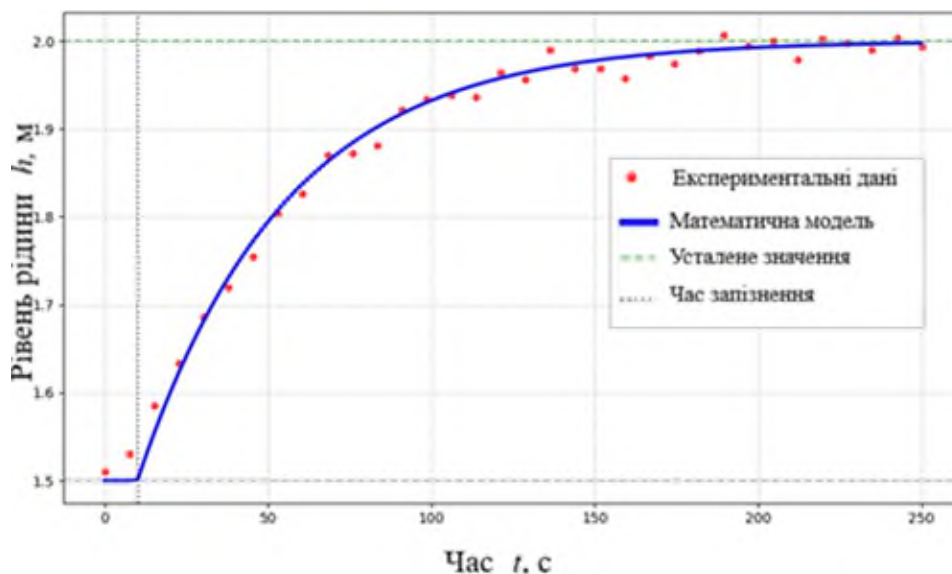


Рис. 2. Графік перехідної характеристики зміни рівня рідини в ємності при східчастій зміні витрати реагенту на вході

Для побудови статичної моделі використовувалися лише дані, отримані в усталеному режимі роботи системи. Результати проведеного експерименту подано в таблиці 1. Для визначення характеристик досліджуваного об'єкта статички було використано метод найменших квадратів.

Таблиця 1. Експериментальні дані

№	Ступінь відкриття клапана (μ)	Рівень у ємності (H)
1	15,0	0,42
2	30,0	0,85
3	50,0	1,45
4	70,0	1,98
5	85,0	2,45

Отримано таке рівняння статичної характеристики:

$$H = 0,029\mu - 0,015.$$

Статичну характеристику керувального каналу наведено на рис. 3.

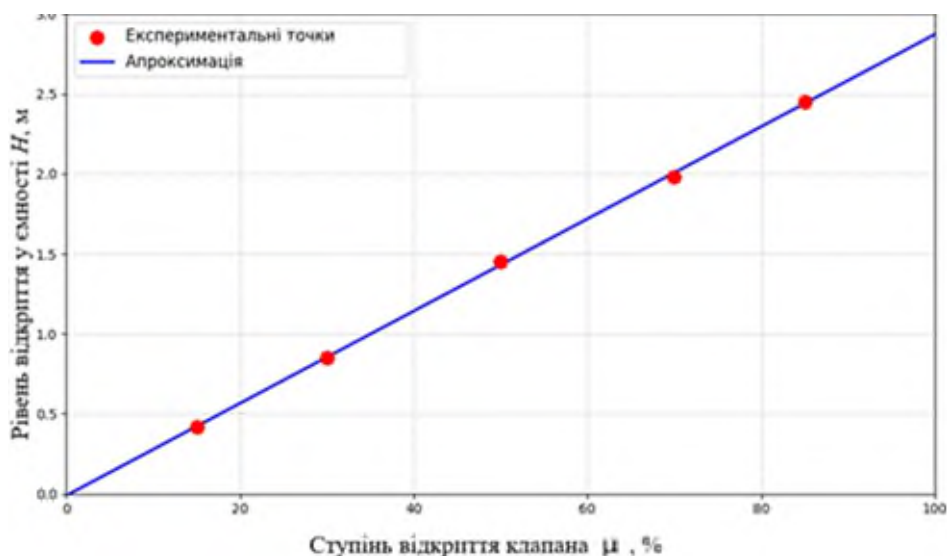


Рис. 3. Статична характеристика керувального каналу

На основі експериментальних даних, отриманих в усталеному режимі роботи, було побудовано статичну характеристику об'єкта із застосуванням методу найменших квадратів. У результаті отримано аналітичну залежність між ступенем відкриття клапана та рівнем рідини в ємності, що адекватно описує поведінку системи. Побудована модель дозволяє оцінити вплив керуючого параметра на вихідну величину та може бути використана для подальшого синтезу системи автоматичного регулювання. Отримані результати підтверджують доцільність використання методів ідентифікації для дослідження технологічних процесів.

1. Zhulynskiy A.A., Ladieva L.R., Korniyenko B.Y. Parametric identification of the process of contact membrane distillation ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Vol.14, Issue 17. (2019) P. 3108-3112.

2. Ладієва Л. Р. Оптимальне керування системами: навчальний посібник. К. : НМЦ ВО, 2000. 187 с.

НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ РЕГУЛЯТОР АТМОСФЕРНОЇ РЕКТИФІКАЦІЇ МІНІ-НАФТОПЕРЕРОБНОГО ЗАВОДУ

Войтюк А. В., Мінчеков М. Ю., Кріт А. І.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, andrey.krit@gmail.com

Стабільність фракційного складу дистилатів атмосферної ректифікаційної колони (АРК) міні-нафтопереробного заводу (міні-НПЗ) визначається точністю керування температурою верху колони за наявності транспортного запізнення ($\tau = 60$ с) та перехресних зв'язків із тиском і потужністю нагрівання. Автоматизація переважної більшості вітчизняних міні-НПЗ обмежується локальними ПІД-контуррами, що призводить до коливань фракційного складу цільового продукту. Перспективним напрямом є синтез нейромережевих регуляторів (НМ-регуляторів), які завдяки непрямому методу навчання здатні врахувати нелінійність і запізнення в об'єкті.

Метою роботи є синтез нейромережевого регулятора для контролю температури верху АРК методом зворотного поширення градієнта через внутрішню *NARX*-модель із фіксованими вагами та кількісна оцінка його ефективності порівняно з ПІД-регулятором, налаштованим аналітичним методом *SIMC* (*Skogestad Simple IMC*), зі статистичною верифікацією результатів.

Об'єктом керування обрано еталонний канал АРК «витрата флегми $L \rightarrow$ температура верху $T_{\text{верх}}$ », описаний передаточною функцією типу «аперіодична ланка першого порядку з запізненням» (*FOPDT*) з параметрами: коефіцієнт підсилення $K = -3,5$ °C/(% витрати); стала часу $T_a = 480$ с; транспортне запізнення $\tau = 60$ с; технологічний допуск ± 3 °C:

$$W(s) = K \cdot e^{-\tau s} / (T_a \cdot s + 1). \quad (1)$$

Внутрішню ідентифікаційну *NARX*-модель попередньо побудовано за результатами імітаційних експериментів у середовищі Python 3.10/SciPy з *PRBS*-збудженням (амплітуда ± 5 % від номінальної витрати; 8 640 пар «вхід–вихід»; крок $\Delta t = 10$ с). Досягнута точність: $R^2 \geq 0,9996$, $MAE = 0,041$ °C, що складає менше 1,5 % від технологічного допуску.

Нейромережевий регулятор реалізовано у вигляді багат шарового перцептрона з чотирма входами ($e(t)$, $e(t-1)$, $e(t-2)$ та $u(t-1)$), трьома прихованими шарами (12–8–4 нейрони, функція активації *tanh*) й одним лінійним виходом керуючим сигналом витрати флегми, масштабованим у діапазон [0; 100 %]. Навчання виконано методом зворотного поширення градієнта через *NARX*-модель із фіксованими вагами (непрямий метод Нарендри–Партхасараті) за критерієм:

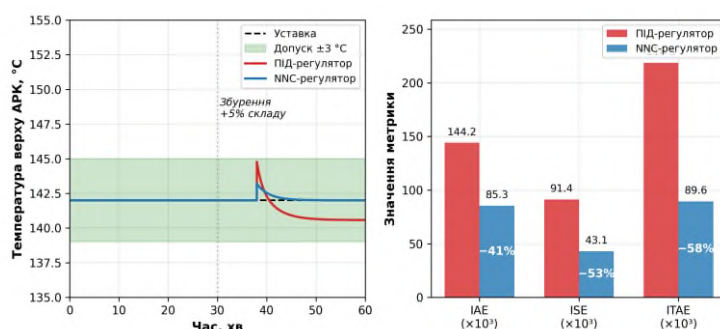
$$J = w_1 \sum [r(t_k) - y(t_k)]^2 + w_2 \sum [\Delta u(t_k)]^2, \quad (2)$$

де $w_1 = 1,0$; $w_2 = 0,01$ – вагові коефіцієнти точності слідування та гладкості керуючого сигналу відповідно; $\Delta u = u(t_k) - u(t_{k-1})$. Горизонт прогнозування $H = 30$ кроків ($\approx 5\tau$), алгоритм оптимізації – Adam ($lr = 0,001$; 200 епох); реалізація – PyTorch 2.0. Базовим варіантом порівняння обрано ПІД-регулятор, налаштований методом *SIMC* при $T_c = 300$ с: $K_p = -0,38$ (% витрати)·°C⁻¹, $T_i = 480$ с, $T_d = 30$ с.

Обидва регулятори досліджено на 50 незалежних імітаційних серіях із варіацією початкових умов, профілю збурень за складом сировини ($\pm 10\%$) та параметрів передавальної функції ($K, T_a, \tau \pm 5\%$). Статистичну значущість різниці перевірено U -тестом Манна–Вітні (двобічний, $\alpha = 0,05$).

Показники якості керування (середні за 50 дослідями)

Показник	<i>NNC</i>	ПІД (<i>SIMC</i>)	Розходження
<i>IAE</i> , °C·хв	85,3	144,2	–41,0 %
<i>ISE</i> , °C ² ·хв	43,1	91,4	–52,8 %
<i>ITAE</i> , °C·хв ²	89,6	218,5	–59,0 %
Макс. перерегулювання, °C	1,2	2,8	–57,1 %
Час встановлення, хв	6,2	13,5	–54,1 %
Коеф. варіації σ/μ , %	6,4	12,8	–50,0 %



Перехідні характеристики при ступінчастому збуренні +5% по складу сировини (ліворуч) і порівняння інтегральних критеріїв якості керування (праворуч)

Нейромережевий регулятор суттєво переважає ПІД за всіма критеріями (*IAE* –41%, *ISE* –53%, *ITAE* –59%); час встановлення 6,2 хв проти 13,5 хв; перерегулювання 1,2 °C проти 2,8 °C). Значущість підтверджено U -тестом Манна–Вітні ($p < 0,001, N = 50$); розподіли регуляторів не перетинаються. Коефіцієнт варіації σ/μ нейромережевого регулятора удвічі менший за ПІД, що свідчить про вищу стійкість до варіації параметрів. Порівняння п'яти архітектур внутрішньої моделі (*NARX, LSTM, GRU, TCN* та *MLP*) за 30-бальним критерієм підтвердило перевагу *NARX* (26 балів); *LSTM* і *GRU* точніші на 5–7%, однак потребують у 3–4 рази більших обчислювальних ресурсів. Отже, запропонований нейромережевий регулятор з *NARX* як внутрішньою моделлю забезпечує покращення інтегральних показників якості керування на 41–59% за прийняттого для промислових ПЛК часу інференсу 0,12 мс/крок і уможливорює реалізацію на контролерах класу ARM Cortex малотоннажних виробництв.

1. Цапар В. С., Ткачук С. М., Математичне моделювання установки атмосферно-вакуумної дистиляції якоб'єкта управління // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова № 4 (502), 2025, С. 247-256. [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).29](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).29)

2. Mahmood, Qahtan & Ibrahim, Huda & Humadi, Jasim & Talal, Amer & Ahmed, Ihab & Ramadhan, Ali. (2026). Comparison of PID and Fuzzy-PID Controller for Liquid Flowrate System. 925-935.

3. Hussain, Mohd. (1999). Review of the Applications of Neural Networks in Chemical Process Control–Simulation and Online Implementation. Artificial Intelligence in Engineering. 13. 55-68. 10.1016/S0954-1810(98)00011-9.

ІНТЕГРАЦІЯ ГІБРИДНИХ МОДЕЛЕЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Кохан О. В., Савченко В. Ю.

Інститут цифровізації освіти НАПН України, iitlt@iitlt.gov.ua

Сучасні системи підтримки прийняття рішень (СППР) постають перед викликами невизначеності, багатокритеріальності та динамічності середовища [1]. Традиційні підходи, що базуються на правилах або простих статистичних моделях, часто не забезпечують необхідної точності та адаптивності. Інтеграція методів штучного інтелекту (ШІ), зокрема машинного навчання, глибоких нейронних мереж та еволюційних алгоритмів, відкриває нові можливості для створення інтелектуальних СППР (*I-DSS*) [2].

Мета роботи – обґрунтувати архітектуру гібридної СППР, яка поєднує передбачувальну аналітику ШІ з пояснювальними механізмами для підвищення довіри та ефективності рішень.

Проблеми класичних СППР та обмеження сучасних ШІ

1. Когнітивне навантаження на особу, що приймає рішення (ОПР): надлишок даних ускладнює інтерпретацію.
2. «Чорний ящик» глибокого навчання: висока точність прогнозів часто супроводжується низькою пояснюваністю (проблема *XAI – explainable AI*).
3. Статичність більшості моделей: погана адаптація до змін зовнішніх умов у реальному часі.
4. Відсутність зворотного зв'язку за якістю рішень: несистематично використовується навчання з підкріпленням для коригування стратегій.

Пропонована гібридна архітектура I-DSS. Запропоновано тривірневу структуру:

- *Рівень 1 – сенсорний (Big Data & IoT):* збирання, фільтрація та попереднє оброблення поточних даних.
- *Рівень 2 – аналітичний (моделі ШІ):* сукупність градієнтного бустингу (*XGBoost, LightGBM*) – для структурованих даних; диференційовані нейромереві блоки; нейромеревні архітектури просторово-часової обробки (*CNN/RNN*) – для часових рядів та зображень.
- *Рівень 3 – когнітивний (СППР):* модуль пояснення (*LIME, SHAP*, контраktivні пояснення); модуль ранжування альтернатив (методи *PROMETHEE, TOPSIS* з вагами, навченими ШІ); інтерактивний інтерфейс для ОПР з можливістю коригування ваг критеріїв.

Методика навчання та налаштування.

- *Навчання з педагогом* на історичних даних (розподіл 70/20/10 на тренування, валідацію, тест).
- *Навчання з підкріпленням (RL)* для динамічного коригування порогів прийняття рішень. *Reward function:* підвищення точності рішення мінус штраф за затримку.

- *Мета навчання (few-shot learning)* для швидкої адаптації до нових типів задач без повторного навчання всієї моделі.

Експериментальна апробація. *Предметна область:* управління ланцюгами поставок (динамічне ціноутворення та вибір постачальника). *Дані:* синтетичний датасет на 500 тис. записів (попит, час доставки, рейтинги постачальників та ін.). Для оцінки ефективності запропонованої гібридної архітектури I-DSS було проведено порівняльний експеримент на основі даних управління ланцюгами поставок (500 тис. записів). Результати (табл. 1) демонструють переваги запропонованого підходу.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз ефективності моделей у складі гібридної СППР

Модель	Точність (F1)	Час пояснення (сек)	Адаптивність (зміна розподілу)
Класична СППР (експертні правила)	0.72	0.1	низька
<i>Random Forest</i> + <i>SHAP</i>	0.85	1.2	середня
Гібридна I-DSS (пропонована)	0.93	0.8	висока

Як видно з табл. 1, гібридна I-DSS перевершує класичну СППР на 21% за точністю ($F1$: 0,93 проти 0,72), поступаючись їй лише на 0,7 секунди за швидкістю пояснень, що є прийнятним компромісом для більшості практичних задач. Водночас, на відміну від *Random Forest*, запропонована модель забезпечує високу адаптивність до змін даних без необхідності повного навчання.

Практичні рекомендації щодо впровадження: починати з простих моделей (логістична регресія) для базової інтерпретації, поступово ускладнюючи; обов'язкове тестування на протилежних прикладах (*adversarial validation*) для перевірки надійності; реалізація протоколу «людина в циклі» (*Human-in-the-loop*): ОПР може скасувати/підкоригувати рекомендацію ШІ, ця подія йде в навчальну вибірку; використання контейнеризації (*Docker*) та *API*-шлюзів для легкої інтеграції з існуючими *ERP/CR*.

Висновки та перспективи. Інтеграція ШІ та СППР дозволяє автоматизувати рутинний аналіз, зберігаючи контроль за критичними рішеннями за людиною. Головна умова успіху – пояснення: без нього рівень довіри ОПР залишається низьким незалежно від точності. Подальші дослідження: застосування трансформерних моделей (*BERT*, *GPT* для табличних даних), розробка метрик оцінки якості пояснень, інтеграція з федеративним навчанням для захисту даних.

1. Jiangang Z, Yusof Ali H. B. AI-Enhanced Decision Support Systems for Strategic Higher Education Management: A Framework for Improving Decision-Making Efficiency and Stakeholder Trust. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 2025. № 15 (10). DOI: <https://doi.org/10.6007/IJARBSS/v15-i10/26819>

2. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI / Arrieta A. B. et al. *Information Fusion*, 2020. Vol. 58. P. 82-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012>

ЦИФРОВІ РЕСУРСИ ДЛЯ FAIR-ДАНИХ В ГАЛУЗІ ОСВІТНІХ НАУК: ОГЛЯД ПЛАТФОРМ ТА ІНСТРУМЕНТІВ

Новицька Т. Л., Лабжинський Ю. А.

Інститут цифровізації освіти НАПН України, iitlt@iitlt.gov.ua

Міжнародний науковий простір переживає глибокі технологічні зміни, зумовлені розвитком інформаційно-цифрових технологій [1], та поширенням відкритої науки (*Open Science*) [2]. Однією з ключових проблем є належне онлайн-представлення дослідницьких даних – як результатів, так і супровідної інформації. В академічній спільноті дедалі ширше визнається необхідність дотримання принципів FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) під час зберігання, керування та обміну даними. Ці принципи, що визначають міжнародні стандарти опрацювання наукової інформації, для освітньої галузі (з її соціально-поведінковими, педагогічними, демографічними й експериментальними даними) є запорукою надійності досліджень, стимулювання співпраці, усунення дублювання робіт та інтеграції у світову науку.

Мета роботи – схарактеризувати основні платформи та сервіси, що реалізують принципи FAIR, та проаналізувати їхній потенціал для освітніх наук.

Основні FAIR-принципи [3]:

- ✓ *Findable* (Відшукуваність) – наявність унікальних ідентифікаторів (DOI) та каталогізація;
- ✓ *Accessible* (Доступність) – чіткі правила доступу й відкриті протоколи;
- ✓ *Interoperable* (Сумісність) – підтримка стандартів обміну даними для роботи в різних системах;
- ✓ *Reusable* (Багаторазовість) – повна документація та умови для повторного використання.

Серед платформ, придатних для зберігання FAIR-даних, варто виокремити:

Zenodo (<https://zenodo.org>) – універсальне сховище від CERN та OpenAIRE. Його переваги: можливість отримання DOI, безпосередня інтеграція з GitHub та автоматизоване формування метаданих. У галузі освітніх наук застосовують для архівації даних опитувань, експериментальних результатів і скриптів обробки.

Figshare (<https://figshare.com>) – хмарна платформа, що вирізняється зручним інтерфейсом, підтримкою DOI та гнучкими налаштуваннями доступу. Оптимальна для роботи з великими масивами даних та інтеграції з журналами.

Dataverse (<https://dataverse.org>) – відкритий репозиторій із підтримкою складної структури даних, гнучким керуванням доступом та генерацією стандартних метаданих. Зручний для статистичних даних і спільних проєктів.

OSF (Open Science Framework) (<https://osf.io>) – платформа для організації проєктів із репозиторієм, інтеграцією з Dropbox/Google Drive, версійністю. Ефективна для довготривалих досліджень.

Інструменти для обробки даних: RStudio/R та *Jupyter Notebooks* – середовища для статистичної обробки, автоматизації, візуалізації. Підтримують відкриті формати та інтеграцію з репозиторіями (*GitHub, Zenodo*).

GitHub / GitLab – хостинг кодів із відкритістю, *DOI* через *Zenodo*, історією змін. Дозволяють зберігати скрипти обробки даних для реплікації аналізів.

OpenRefine – інструмент для очищення й перетворення табличних даних, що підвищує якість перед розміщенням у репозиторії.

Сервіси для метаданих і сумісності: стандарти *Schema.org*, *DCAT*, *DataCite* – забезпечують машинну обробку, відтворюваність і сумісність даних.

FAIRsharing.org – каталог стандартів і репозиторіїв, що допомагає дослідникам обирати відповідні схеми метаданих для своєї дисципліни.

Виклики та перспективи в освітніх науках. Проблеми: різномірність даних (експериментальні, опитувальні, поведінкові, адміністративні); конфіденційність (дані студентів і викладачів); відсутність усталених стандартів у деяких підгалузях [4]. *Перспективи*: створення локальних FAIR-репозиторіїв у вишах, інтеграція з міжнародними платформами, розвиток спільнот обміну знаннями.

З огляду на зазначене, використання FAIR-даних стає обов'язковою умовою проведення якісних освітніх досліджень. Виконаний аналіз доводить, що жодна із сучасних платформ не реалізує всіх етапів роботи з даними в межах одного інструменту – від збирання до багаторічного зберігання та повторного застосування. Найефективнішим є комбіноване застосування спеціалізованих сервісів. Особливої уваги потребує дотримання конфіденційності в освітніх дослідженнях: платформи з гнучким контролем доступу разом із локальною попередньою обробкою дають змогу узгоджувати FAIR-принципи з вимогами законодавства про персональні дані.

Необхідною умовою забезпечення сумісності й інтеграції у світовий науковий простір є застосування стандартів метаданих (зокрема за допомогою *FAIRsharing.org*). Водночас упровадження FAIR-принципів у сфері освітніх наук передбачає не тільки технічну складову, але й наявність усвідомленої стратегії управління дослідницькими даними, а також підвищення рівня цифрової компетентності дослідників. Перспективи подальших студій вбачаються у формуванні галузевих рекомендацій та створенні національних інфраструктур, орієнтованих на специфіку освітніх даних.

1. Іванова С. М., Вакалюк Т. А., Мінтій І. С., Кільченко А. В. Інформаційно-цифрові технології як засоби оцінювання результативності науково-педагогічних досліджень. *Вісник Національної академії педагогічних наук України*. 2022. Т. 4. № 1. С. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.37472/v.naes.2022.4114>

2. Новицька Т. Л., Іванова С. М., Кільченко А. В. Відкриті освітньо-наукові інформаційні системи як засіб моніторингу вебсайту наукової установи. *Освіта. Інноватика. Практика*. 2025. Вип.13 (5). С. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol13i5-00>

3. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship / M. D. Wilkinson et al. *Scientific Data*, 2016. Vol. 3. № 160018. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>

4. Новицька Т. Л. Платформи та сервіси для зберігання та обробки FAIR-даних: стратегії для освітньої галузі. *Сучасні трансформації педагогічної освіти: проблеми теорії і практики*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 29-30 січ. 2026 р. / за заг. ред. М. І. Воровки. ФОП Однорог Т. В., 2026. С. 454-457. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/748584>

МОНІТОРИНГ *FAIR*-ВІДПОВІДНОСТІ ВЕБРЕСУРСІВ НАУКОВОЇ УСТАНОВИ: ВІД ДАНИХ ДО УПРАВЛІНСЬКОГО РІШЕННЯ

Кільченко А. В., Ткаченко В. А.

Інститут цифровізації освіти НАПН України, iitlt@iitlt.gov.ua

В умовах розвитку відкритої науки (*Open Science*) вебресурси наукових установ стають критично важливими для поширення даних [1], проте системна перевірка їхньої відповідності принципам *FAIR* [2] зазвичай відсутня. Для ефективного управління такими ресурсами необхідні інструменти трансформації статистики у стратегічні рішення. Завдяки подійній моделі даних, платформа *Google Analytics 4 (GA4)* постає дієвим засобом моніторингу та основою для систем підтримки прийняття рішень щодо оптимізації вебресурсів та підвищення їхньої *FAIR*-відповідності. На відміну від традиційної вебаналітики, яка фокусувалася на сеансах (візитах), надаючи лише кількісну картину, *GA4* орієнтована на події, що дозволяє оцінювати якість взаємодії з науковим контентом відповідно до чотирьох принципів:

➤ *Findable (Відшукуваність)* оцінюється за джерелами трафіку. Домінування каналу «*Organic Search*» підтверджує якість метаданих та ефективність індексації в *Google Scholar*, *Crossref* та ін. Високий рівень відшукуваності статей за ключовими словами свідчить про їхню видимість у пошукових системах.

➤ *Accessible (Доступність)* моніториться через технічні звіти, що дозволяє виявити перешкоди доступу до контенту. Географічний розподіл відвідувачів підтверджує відсутність регіональних обмежень у поширенні знань.

➤ *Interoperable (Сумісність)* фіксується через крос-платформне відстеження та аналіз переходів на суміжні ресурси (наприклад, за *DOI* до репозиторіїв), що демонструє здатність даних до взаємодії з іншими системами.

➤ *Reusable (Повторне використання)* підтверджується подією завантаження файлів або наборів даних. Це базовий індикатор затребуваності контенту для подальшого цитування та використання у нових дослідженнях.

На прикладі сайту наукової установи Інституту цифровізації освіти НАПН України (ІЦО НАПН України) за допомогою *GA4* проведемо моніторинг одного з принципів *FAIR* – *Accessible (Доступність)* за 2025 р. [3]. Цей принцип підтверджується даними статистичних звітів *GA4*, які відображають взаємодію та активність користувачів – *Огляд залучення*: кількість подій і переглядів та середній час взаємодії на активного користувача на сайті ІЦО НАПН України за 2025 р.

Аналіз кількісних показників свідчить про сталу затребуваність наукових матеріалів: частка сеансів із залученням сягає 0,69. Із загальної кількості у 52 тис. подій значну частину становлять цільові дії – перегляди сторінок та завантаження (30 тис.). Розподіл за ключовими подіями (*page_view*, *session_start*, *first_visit*) демонструє активну взаємодію користувачів із контентом, що є критично важливим для моніторингу реального стану впровадження принципів *FAIR*.

Рівень міжнародної доступності наукових результатів ІЦО НАПН України підтверджується даними про географічну диверсифікацію відвідувачів (рис. 1).

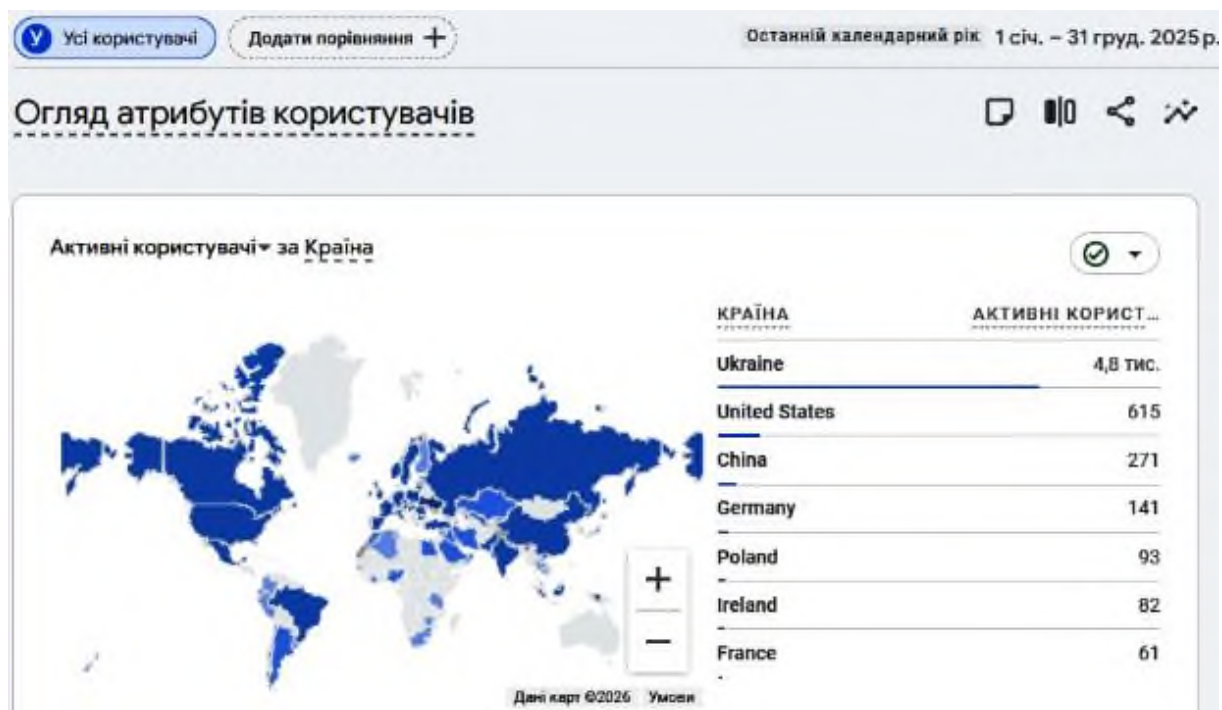


Рис. 1. Огляд атрибутів користувачів сайту ЦО НАПН за GA4 за 2025 р.

Значна кількість міжнародних звернень – зокрема зі США, Китаю та Німеччини – на фоні 4,8 тис. користувачів з України свідчить про дотримання нормативних вимог до сучасних цифрових наукових платформ та високий рівень інтернаціоналізації освітньої науки. Аналіз мовних налаштувань та локацій підтвердив запит на англійськомовні версії метаданих, що є важливим для розширення присутності в міжнародних базах даних. Алгоритм трансформації даних в управлінське рішення включає: *моніторинг* (збирання даних у GA4); *діагностику* (перевірку гіпотез щодо причин зниження показників, наприклад, через невідповідність форматів даних); *прийняття рішень* (впровадження адаптивних форматів чи редизайн сторінок).

Таким чином, використання GA4 дозволяє науковій установі вийти за межі пасивного збирання статистики. Це інструмент об'єктивного контролю за реалізацією принципів відкритої науки. Впровадження методик аналізу FAIR-відповідності на основі вебаналітики забезпечує доказову базу для прийняття управлінських рішень, спрямованих на підвищення видимості та впливовості вітчизняних наукових досліджень у світі. Перспективи досліджень спрямовані на автоматизацію та інтерактивну візуалізацію процесів такого моніторингу.

1. Новицька Т. Л., Іванова С. М., Кільченко А. В. Відкриті освітньо-наукові інформаційні системи як засіб моніторингу вебсайту наукової установи. *Освіта. Інноватика. Практика*. 2025. Вип. 13 (5). С. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol13i5-00>.

2. Новицька Т. Л. Платформи та сервіси для зберігання та обробки FAIR-даних: стратегії для освітньої галузі. *Сучасні трансформації педагогічної освіти: проблеми теорії і практики*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 29-30 січ. 2026 р. / за заг. ред. М. І. Воронки. ФОП Однорог Т. В., 2026. С. 454-457. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/748584>.

3. Лабжинський Ю. А., Кільченко А. В., Ткаченко В. А. Моніторинг використання вебресурсу «Сайт Інституту цифровізації освіти НАПН України» за допомогою Google Analytics 4: звіт за 2025 рік / за ред. А. В. Кільченко. К.: ЦО НАПН України, 2026. 17 с. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/748251>.

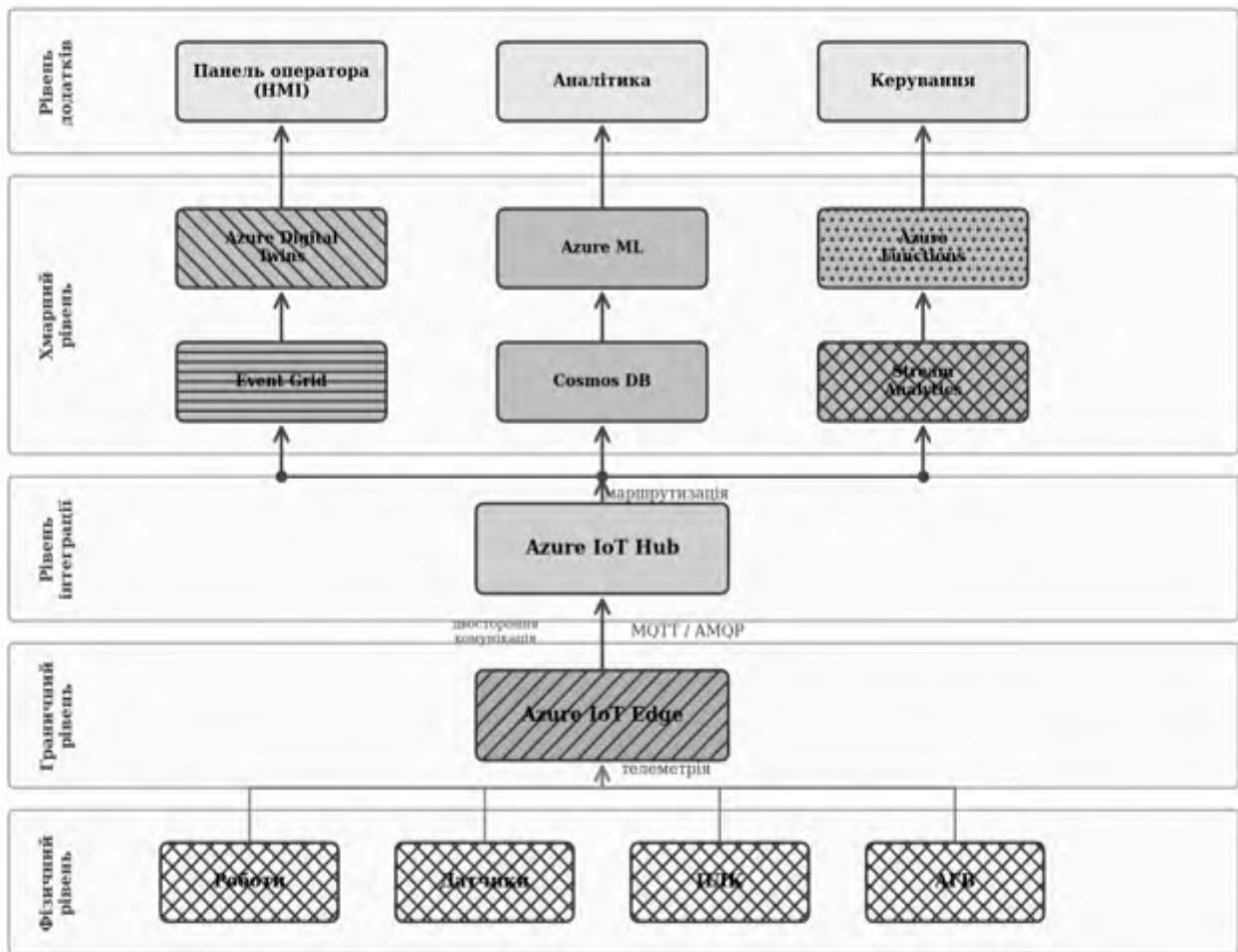
АРХІТЕКТУРА ХМАРНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ РОБОТИЗОВАНИМИ СИСТЕМАМИ

Ковалюк Д. О., Счастливцев Д. С.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, d.kovalyuk@kpi.ua

Комп'ютерно-інтегровані роботизовані системи (КІРС) є одним із ключових елементів сучасного автоматизованого виробництва. Традиційні централізовані архітектури керування ними мають суттєві обмеження щодо масштабування за кількістю підключених пристроїв і обсягів оброблюваних даних, що спричиняє затримки, критичні для задач реального часу. Хмарні технології у поєднанні з архітектурою мікросервісів розглядають як перспективний напрям подолання цих обмежень [1], однак інтеграція спеціалізованих сервісів у цілісну платформу керування КІРС потребує одночасного врахування технологічних та експлуатаційних аспектів промислових процесів [2].

Метою роботи є розробка та експериментальна верифікація мікросервісної архітектури хмарної платформи на базі Microsoft Azure для керування КІРС із кількісним гарантуванням якості обслуговування (обмежень на затримку та пропускну спроможність) та надійності.

Запропоновано п'ятирівневу архітектуру платформи, подану на рисунку.



П'ятирівнева архітектура хмарної платформи керування КІРС на базі Microsoft Azure

Архітектура платформи містить: фізичний рівень (роботи, датчики, ЧПК, АРТ); граничний рівень (*Azure IoT Edge* з локальною фільтрацією та агрегацією телеметрії); рівень інтеграції (*Azure IoT Hub*, двостороння MQTT/AMQP-комунікація); хмарний рівень (*Azure Digital Twins*, *Azure ML*, *Azure Functions*, *Cosmos DB*, *Event Grid*, *Stream Analytics*) та рівень додатків (HMI, аналітика, керування).

Платформа складається з шести мікросервісів (*API Gateway*, *Telemetry Processor*, *Command Dispatcher*, *Analytics Engine*, *Notification Service*, *Device Registry*), комунікація між якими здійснюється через *Azure Service Bus* і *REST/gRPC*. Для підвищення відмовостійкості застосовано патерни *Circuit Breaker*, *Saga*, *CQRS* та *Event Sourcing*.

Для аналізу якості обслуговування розроблено комплексну математичну модель, що поєднує: аналіз затримок засобами теорії масового обслуговування (моделі *M/M/1* та *M/M/c*) з оцінюванням квантилів T_p часу перебування в системі; оцінку надійності марківським ланцюгом з неперервним часом і чотирма станами (*Active*, *Degraded*, *Failed*, *Recovery*); задачу оптимального розподілу навантаження між хмарними та периферійними вузлами як задачу лінійного програмування з цільовою функцією

$$\sum w_i d_{i,j} x_{i,j} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де сумування виконується за всіма парами (тип запиту i , вузол j); w_i — ваговий коефіцієнт пріоритету; $d_{i,j}$ — очікувана затримка обробки; $x_{i,j}$ — частка навантаження, що спрямовується у відповідний вузол (змінна оптимізації).

Система безпеки побудована за принципом *defense-in-depth*: *OAuth 2.0* з *Azure AD B2C* на рівні автентифікації, *mutual TLS* та керовані ідентичності (*Managed Identity*) для міжсервісної комунікації, шифрування *TLS 1.3 in-transit* та *AES-256 at-rest*; класифікацію загроз виконано за моделлю *STRIDE*.

Безперебійне оновлення платформи забезпечує *CI/CD*-конвеєр із *blue-green deployment* та автоматизованим тестуванням (кб, *smoke*-тести) з середнім часом розгортання ≈ 18 хв.

Експериментальну верифікацію проведено на тестовому стенді (кластер із чотирьох *VM Standard_D4s_v3* у *Azure* та локальні емулятори *Azurite*, *Azure Service Bus*; генератор навантаження кб; 50–500 імітованих пристроїв). Отримано такі показники: наскрізна затримка 50–150 мс для навантажень до 3800 запитів/с. Порівняно з традиційною централізованою системою середня затримка скоротилася у 6 разів, пропускна спроможність зросла у 4,7 рази за збільшення вартості інфраструктури лише на 20 %.

Отже, запропонована п'ятирівнева мікросервісна архітектура забезпечує поєднання якості обслуговування, надійності та масштабованості, необхідне для промислових КІРС, і є основою для практичного впровадження хмарно-периферійних платформ керування виробничими процесами.

1. Velepucha V., Flores P. A Survey on Microservices Architectures: Principles, Patterns and Trade-Offs. IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 88339–88358. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3305687.

2. Mourtzis D., Angelopoulos J., Panopoulos N. A Literature Review of the Challenges and Opportunities of the Transition from Industry 4.0 to Society 5.0. Energies. 2022. Vol. 15, No. 17. Article 6276. DOI: 10.3390/en15176276.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ТА ВОДЯНОЇ ПАРИ ЗА ДОПОМОГОЮ КОТЛОАГРЕГАТІВ

Решиковець М. О., Повстяной О. Ю.

Луцький національний технічний університет, povstjanoj@ukr.net

Автоматизація – це застосування комплексу засобів, що дозволяють здійснювати виробничі процеси без особистої участі людини, але під її контролем. Автоматизація виробничих процесів призводить до збільшення випуску, зниження собівартості і поліпшення якості продукції, зменшує чисельність обслуговуючого персоналу, підвищує надійність і довговічність машин, дає економію матеріалів, поліпшує умови праці і техніку безпеки [1].

За рівнем автоматизації теплоенергетика займає одне з провідних місць серед інших галузей промисловості. Теплоенергетичні установки характеризуються безперервністю процесів, що протікають у них. При цьому вироблення теплової й електричної енергії в будь-який момент часу повинно відповідати споживанню (навантаженню). Майже всі операції на теплоенергетичних установках механізовані, а перехідні процеси в них розвиваються порівняно швидко. Цим обумовлюється високий розвиток автоматизації в тепловій енергетиці [2].

Автоматизація парогенераторів містить у собі автоматичне регулювання, дистанційне керування, технологічний захист, теплотехнічний контроль, технологічні блокування і сигналізацію.

Дистанційне керування дозволяє черговому персоналу запускати і зупиняти парогенераторну установку, а також переключати і регулювати її механізми на відстані, з пульта, де зосереджені пристрої керування.

Теплотехнічний контроль за роботою парогенератора й устаткування здійснюється за допомогою спеціалізованих пристроїв, що діють автоматично. Дані пристрої ведуть безперервний контроль процесів, що протікають у парогенераторній установці, або ж підключаються до об'єкта вимірювання обслуговуючим персоналом або комп'ютером. Прилади теплотехнічного контролю розміщують на панелях, щитах керування, по можливості зручно для спостереження й обслуговування.

Виробництво діоксиду вуглецю здійснюється частіше як додатковий процес утилізації димових газів при виробництві теплової енергії або утилізації продуктів бродіння на спиртових заводах. Однак налагодити виробництво кінцевого продукту найвищої якості у такий спосіб не вдається.

Для забезпечення технологічного процесу, в якому передбачене використання пари для процесу десорбції CO_2 з розчину моноетаноламіну, на тепловому підприємстві передбачається встановлення двох котлоагрегатів: ДКВР-2.5/13 та ДЕ-4-13ГМ з відповідними потужностями 2,5 т/год і 4 т/год пари, котрі працюють на спільний паровий колектор.

Під час роботи в таких котлоагрегатах утворюються два взаємодіючі один з одним потоки: потік робочого тіла і потік теплоносія, що утворюється в топці.

У результаті цієї взаємодії на виході об'єкта виходить пара заданого тиску і температури.

Однією з основних задач, що виникають у процесі експлуатації котельного агрегату, є забезпечення рівності між виробленою і споживаною енергією. У свою чергу процеси паротворення і передачі енергії в котлоагрегаті однозначно пов'язані з кількістю речовини в потоках робочого тіла і теплоносія.

Основною задачею, яку повинна вирішити автоматизація котлоагрегатів, є забезпечення технологічного процесу виробництва CO₂ необхідними складовими, а саме: парою і димовими газами з певними параметрами.

Автоматична система управління котлоагрегатами повинна забезпечувати технологічний процес необхідними складовими з певними параметрами, а саме:

- парою з тиском $P = 6-7$ атм і температурою $T = 150-170$ °С (в залежності від кількості працюючих технологічних ліній);
- димовими газами з відповідною витратою і процентним вмістом діоксиду вуглецю CO₂ 8–9 %.

Проектована система автоматизації, що працює на природному газі, дасть змогу підвищити ККД і тим самим суттєво підвищити економію газу. Покращення автоматизованої системи регулювання співвідношення витрат газ-повітря шляхом введення корекції за вмістом кисню у димових газах дає змогу виключити вплив таких негативних факторів, як зміна густини газу і повітря, що подаються.

При проектуванні системи автоматизації враховувалися також такі фактори, як точність регулювання вихідних параметрів, надійність, можливість подальшого нарощування системи та програмної зміни її архітектури. Дається можливість підключення системи до керуючого обчислювального комплексу для створення таким чином верхнього рівня АСУ.

1. Автоматизація виробничих процесів: підручник / І.В. Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький, С.М. Швед. Вид. 2-ге. Виправл. Київ.: Видавництво Ліра-К, 2026. 378 с.

2. Економічне обґрунтування впровадження робототехнічних систем у тепличні господарства / В. П. Лисенко, І. М. Болбот, І. І. Чернов // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2019. Вип. 174(2). С. 53-59.

FAIR-ДАНИ В ГАЛУЗІ ОСВІТНІХ НАУК: ВІД ПІДГОТОВКИ ДО ОПРИЛЮДНЕННЯ

Іванова С. М., Шиненко М. А.

Інститут цифровізації освіти НАПН України, iitlt@iitlt.gov.ua

Публікація дослідницьких даних відповідно до *принципів FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable)* [1] у науковому середовищі сьогодні стає не просто рекомендацією, а вимогою багатьох міжнародних журналів, грантодавців та репозиторіїв. Проте процес підготовки та оприлюднення FAIR-даних містить низку практичних аспектів, які часто залишаються поза увагою дослідника. Невраховання цих нюансів призводить до того, що дані формально вважаються опублікованими, але фактично не є *відшукуваними, доступними, сумісними та придатними для повторного використання* [2]. **Метою роботи** є систематизація ключових вимог та практичних кроків, які необхідно врахувати досліднику для успішної публікації FAIR-даних. Перед публікацією варто врахувати наступне:

1. Вибір відповідного репозиторію. Першим і критично важливим кроком є вибір місця для зберігання даних. Не всі репозиторії однаково підтримують FAIR-принципи. Досліднику слід звернути увагу на такі *характеристики*:

- ✓ наявність присвоєння *постійних ідентифікаторів* (DOI, Handle);
- ✓ підтримка *стандартів метаданих* (DataCite, DCAT, Schema.org);
- ✓ відкритість *протоколів доступу* (без необхідності логіну для читання);
- ✓ чітка *політика ліцензування* (Creative Commons, Open Data Commons).

Рекомендованими є перевірені репозиторії: Zenodo, Figshare, Dataverse, а також галузеві сховища, індексовані в реєстрі FAIRsharing.org.

Доцільно, щоб єдиним видавцем виступала наукова установа. Куратор відповідає за ведення метаданих і даних, надає роз'яснення щодо їхнього змісту, а також умов доступу та ліцензій.

2. Підготовка даних до публікації. Оприлюднення неопрацьованих даних без належної обробки є поширеною помилкою. Перед публікацією необхідно:

- ✓ *очистити дані* від зайвої, дубльованої або конфіденційної інформації (використовуючи OpenRefine або подібні інструменти);
- ✓ *перетворити дані у відкриті формати* (CSV, JSON, XML, RDF замість закритих .xlsx, .docx або .pdf);
- ✓ *задокументувати дані* – додати README-файл з описом структури, одиниць вимірювання, методів збирання та обмежень використання;
- ✓ *передбачити керування версіями* – позначити версію набору даних (v1.0, v2.0) для відстеження змін.

3. Створення якісних метаданих. Метадані – це те, що робить дані відшукуваними та зрозумілими для машин і людей. При публікації FAIR-даних обов'язково мають бути вказані:

- ✓ *заголовок та анотація* набору даних (мовою оригіналу та англійською);
- ✓ *автори* (з ORCID iD для однозначної ідентифікації);
- ✓ *дата публікації та дата створення* даних;

- ✓ *ключові слова* (відповідно до галузевих тезаурусів);
- ✓ *інформація про фінансування* (грантодавець, номер гранту);
- ✓ *ліцензія* (якщо не вказано – дані юридично не є повторно використовуваними). Ліцензія не тільки надає доступ, а й визначає дозволені способи використання даних. Для дослідницьких даних загальноприйнятою рекомендацією є ліцензія CC-BY 4.0.

4. Забезпечення юридичної чистоти та етичних норм. Публікація даних не має порушувати законодавство та етичні стандарти. Особливо це актуально для освітніх, медичних та соціальних наук, де дані можуть містити персональну інформацію. Тому потрібно: *анонімізувати* або *псевдонімізувати* (знеособити) дані, що ідентифікують осіб; *отримати інформовану згоду* учасників дослідження на публікацію даних (у формі, що дозволяє відкрите поширення); *узгодити ліцензію* з політикою установи та вимогами співавторів; *перевірити наявність обмежень* щодо експорту даних за кордон (для чутливих технологій).

5. Зв'язок даних із публікацією. FAIR-принципи передбачають не просто окрему публікацію даних, а їхню інтеграцію з науковою статтею. Рекомендується: вказати *посилання на набір даних* у тексті статті (з DOI); у метаданих репозиторію *зробити зворотне посилання* на статтю (за DOI або URL); використовувати *цитовання даних* як повноцінного наукового результату (Data Citation); за можливості *прив'язати код аналізу* до даних (через GitHub/Zenodo інтеграцію).

6. Контроль якості перед публікацією (self-FAIR check). Перед остаточним оприлюдненням варто перевірити підготовлений набір за критеріями:

- ✓ *відшукуваність* даних через пошукові системи за назвою чи DOI;
- ✓ *доступність* без реєстрації, перевірка коректності посилання на дані;
- ✓ наявність *машинозчитуваних* метаданих (JSON-LD, RDF);
- ✓ підтвердження *умов повторного використання* (наявність ліцензії).

Існують автоматизовані інструменти для оцінки FAIR-відповідності (F-UJI, FAIR Evaluator), які доцільно використовувати як фінальну перевірку.

Отже, публікація FAIR-даних – це не одноразовий акт завантаження файлів, а системний процес, що охоплює вибір репозиторію, підготовку даних, створення метаданих, юридичний супровід та зв'язування з публікаціями. Успішне врахування всіх перелічених аспектів перетворює набір даних із пасивного додатка до статті на самостійний, цитований, повторно використовуваний науковий продукт. Для дослідників в освітній галузі, де культура публікації даних лише формується, дотримання цих рекомендацій є важливим для інтеграції у міжнародний науковий простір та підвищення прозорості власних досліджень. Перспективним напрямом є розроблення галузевих чек-листів та навчальних модулів для молодих науковців з практик FAIR-публікації.

1. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship / M. D. Wilkinson et al. *Scientific Data*, 2016. Vol. 3. № 160018. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>.

2. Новицька Т. Л. Платформи та сервіси для зберігання та обробки FAIR-даних: стратегії для освітньої галузі. *Сучасні трансформації педагогічної освіти: проблеми теорії і практики*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 29-30 січ. 2026 р. / за заг. ред. М. І. Воронки. ФОП Однорог Т. В., 2026. С. 454-457. URL: <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/748584>.

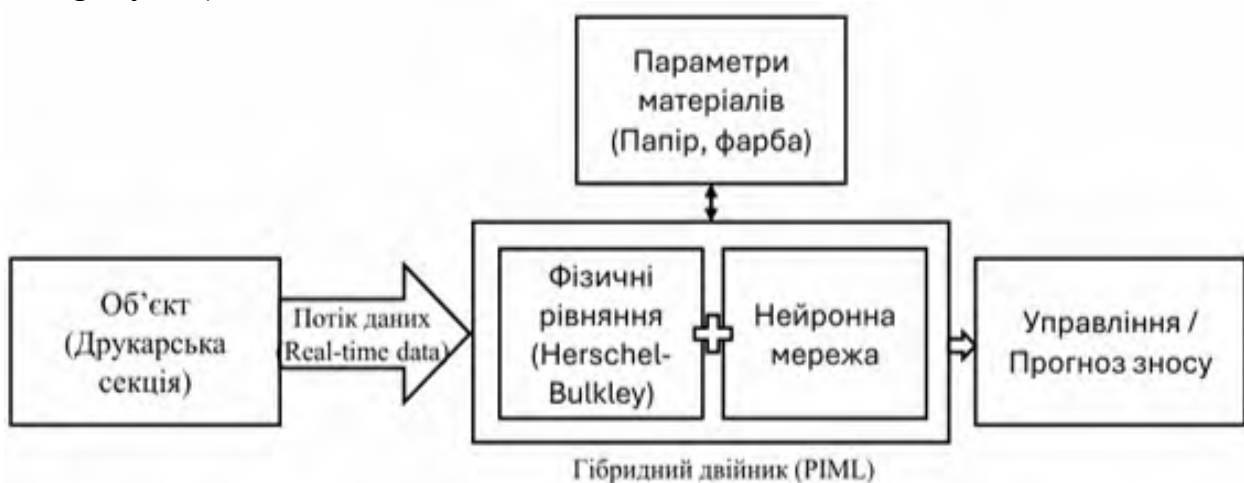
АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ПОЛІГРАФІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Чінкує Камелія

НУ «Львівська політехніка», kameliia.chinkue.ki.2023@lpnu.ua

Концепція цифрового двійника формується на перетині математичного моделювання, сенсорних мереж та обчислювальних платформ реального часу. Попри розповсюдження в аерокосмічній та енергетичній галузях, поліграфічне виробництво залишається периферійним для таких досліджень [1]. Водночас складність його технологічних процесів цілком відповідає умовам, за яких цифровий двійник забезпечує найбільший практичний ефект.

У поліграфічному процесі взаємодіють три фізично різнорідні підсистеми: механічна (приводи та вали), реологічна (подача і перенесення фарби) та термічна (сушіння або УФ-закріплення). Кожна з них потребує специфічного математичного опису – від диференціальних рівнянь динаміки приводу до нелінійних рівнянь течії Гершеля-Балклі для тиксотропних фарб. Поєднання цих підсистем у єдину узгоджену модель становлять головну методологічну проблему галузі (див. рисунок).



Структурна схема гібридного цифрового двійника поліграфічної секції

Дослідження досвіду впровадження подібних систем дозволяє виокремити три підходи до побудови цифрових двійників. Перший – фізично обґрунтовані моделі (*Physics-Based Models, PBM*), що базуються на фундаментальних законах. Вони забезпечують високу інтерпретованість результатів, проте складні в ідентифікації параметрів. Другий – моделі, керовані даними (*Data-Driven Models, DDM*), де використовуються нейромереві апроксимації. Їхня слабкість полягає у вразливості до розподільного зсуву (*distribution shift*) при зміні матеріалів. Третій підхід – гібридні моделі (*Physics-Informed Machine Learning, PIML*). У них фізичні обмеження інтегруються безпосередньо в архітектуру нейронної мережі, що поєднує точність *PBM* з адаптивністю *DDM* [2].

Окремої уваги потребує питання обчислювальної реалізації в умовах жорстких часових обмежень. Для рулонних машин зі швидкістю полотна 10–15 м/с цикл оновлення моделі має не перевищувати 1–2 мс, що унеможливує використання хмарних обчислень як основної платформи виконання. Перспективною альтернативою є edge-computing архітектури на базі промислових контролерів із підтримкою апаратного прискорення нейромережевих обчислень. Хмарний рівень у такій схемі відіграє роль сховища для перенавчання моделі та накопичення статистики відхилень у розрізі матеріалів і режимів друку.

Верифікація цифрового двійника поліграфічної секції є самостійною методологічною задачею, оскільки стандартні метрики якості моделі – середньоквадратична похибка, коефіцієнт детермінації – не відображають її поведінки в динамічних перехідних режимах, які є найбільш критичними з точки зору виникнення браку. Для коректної оцінки необхідне порівняння часових рядів модельних та вимірних параметрів у режимах розгону, гальмування та зміни матеріалу, що потребує спеціально спроектованих випробувальних протоколів.

Таким чином, побудова цифрового двійника для поліграфічного обладнання є технічно обґрунтованим напрямом, що потребує узгодженого вирішення трьох взаємопов'язаних задач: розробки гібридної моделі з вбудованими фізичними обмеженнями, забезпечення обчислювального циклу в межах вимог реального часу та формування методики верифікації на перехідних режимах роботи машини.

Специфічною перешкодою для поліграфії є варіативність вхідних матеріалів: параметри паперу та фарби суттєво відрізняються навіть у межах одного постачальника [3]. Тому, цифровий двійник повинен містити блоки ідентифікації параметрів у реальному часі або спиратися на байєсівські підходи для моделювання невизначеності.

Важливою задачею залишається синхронізація. У рулонних машинах швидкість полотна сягає 15 м/с, тому затримка між вимірюванням та корекцією навіть у кілька мілісекунд призводить до значних втрат матеріалу. Це висуває жорсткі вимоги до обчислювальної архітектури та протоколів обміну даними. Розроблення *PIML*-архітектур, адаптованих до таких режимів, є перспективним напрямом подальших досліджень.

1. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Risk in the Product Lifecycle. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer, 2017. P. 85–113.

2. Park K. T. Digital twin-based cyber physical production system architectural framework for personalized production / K. T. Park, S. J. Im, S. D. Kang et al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 106, No. 5. P. 1787-1810.

3. Чінкує К. Імітаційний цифровий двійник поліграфічної установки з інтелектуальними алгоритмами. *Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики*. №2, 2025. С. 300-302.

ІНТЕРАКТИВНА ПОЛІГРАФІЯ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ МАШИННОГО ЗОРУ ТА *AR* З ВИКОРИСТАННЯМ *CV*-АЛГОРИТМІВ

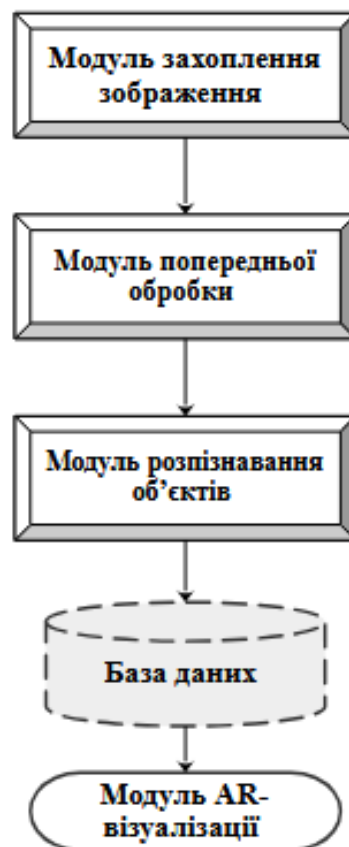
Чінкує Паола

НУ «Львівська політехніка», paola.chinkue.ki.2023@lpnu.ua

Сучасний розвиток інформаційних технологій сприяє трансформації традиційної поліграфії у напрямку інтерактивності. Одним із перспективних підходів є використання доповненої реальності (*AR*), яка дозволяє поєднувати фізичні друковані матеріали з цифровим контентом.

Основою таких рішень є технології комп'ютерного зору, що забезпечують розпізнавання зображень, маркерів або об'єктів у реальному часі [1]. Це відкриває можливості створення інтерактивних друкованих матеріалів, які реагують на взаємодію користувача та забезпечують доступ до мультимедійної інформації.

Запропонована система інтерактивної поліграфії, зображена на рисунку, складається з кількох ключових компонентів: модуль захоплення зображення, модуль попередньої обробки, модуль розпізнавання об'єктів, база даних та модуль *AR*-візуалізації.



Архітектура системи інтерактивної поліграфії
з використанням *AR* та комп'ютерного зору

На першому етапі здійснюється захоплення зображення друкованого матеріалу за допомогою камери мобільного пристрою. Далі виконується попередня

обробка зображення, що включає нормалізацію освітлення, фільтрацію шумів та виділення ключових ознак [2].

Алгоритми розпізнавання, зокрема методи комп'ютерного зору та глибинного навчання, дозволяють ідентифікувати об'єкт і визначити його просторове положення. Після цього система звертається до бази даних, де зберігається відповідний цифровий контент.

На завершальному етапі відбувається накладання віртуальних об'єктів на реальне зображення в режимі реального часу, що створює ефект доповненої реальності та підвищує рівень взаємодії користувача з друкованою продукцією.

Використання запропонованого підходу дозволяє розширити функціональні можливості поліграфії, підвищити зацікавленість користувачів та впроваджувати нові формати подачі інформації. Особливо ефективним є застосування нейромережних моделей, які забезпечують високу точність розпізнавання навіть у складних умовах [2].

Отже, інтеграція технологій комп'ютерного зору та доповненої реальності є перспективним напрямом розвитку поліграфічної галузі [1, 2]. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію алгоритмів та підвищення продуктивності систем.

1. Чінкує П., Чінкує К. Інтерактивне AI-середовище як засіб оптимізації навчання поліграфічних спеціальностей. Одеса : Одеський національний технологічний університет, Вінницький національний технічний університет, Інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації, робототехніки та програмування ім. П. Н. Платонова, 2025. С. 409–410.

2. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. 2nd ed. Springer, 2022. 925 p.

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИМИ БУДІВЛЯМИ

Кравцов С. В., Жесан Р. В.

Центральноукраїнський національний технічний університет, zherom@ukr.net

У післявоєнній модернізованій енергосистемі України, побудованій на принципах захисту енергооб'єктів, децентралізованої генерації, диверсифікації та наявності стратегічного резерву [1], важливу увагу має бути приділено розвитку і збільшенню кількості споживачів, які виробляють теплову й електричну енергію для власних потреб, а також спрямовують надлишки в загальну мережу. У якості таких споживачів-виробників енергії можуть виступати сучасні енергоефективні будівлі та споруди, у яких, на рівні з традиційними когенераційними установками, в якості розподілених енергетичних ресурсів та додаткових джерел енергії можуть виступати відновлювані джерела енергії (ВДЕ), газові та дизельні генератори, акумуляторні системи зберігання електроенергії, електричні транспортні засоби та керовані навантаження (системи опалення й кондиціонування, водонагрівачі) [2].

Відповідно до Директиви Європейського Союзу про енергетичну ефективність будівель [3], з 2021 року енергетичні показники всіх нових будинків мають відповідати показникам будівель з мінімальним або нульовим споживанням енергії на шляху до енергетичної нейтральності. Ми також не можемо ігнорувати ці вимоги, з огляду на обраний шлях євроінтеграції. І, зрозуміло, що процес енергооптимізації неможливий без вдосконалення існуючих і створення нових систем автоматичного керування (САК) інженерними підсистемами у загальних системах життєзабезпечення.

У реалізованих на сьогодні в світі проектах енергоефективних будівель існуючі системи електропостачання, на основі ВДЕ, інженерні системи споруд та САК ними нині не інтегровані в єдиний технологічний процес, який має бути спрямований на злагоджене підвищення енергоефективності будівель. Загальна економічна ефективність, зручність експлуатації та керування всім технологічним обладнанням будівель може бути підвищена, завдяки комплексному вирішенню завдань автоматизації, як на рівні локальних систем, так і на рівні систем диспетчеризації та САК. Доцільним є поглиблене вивчення питання переходу від програмованих логічних контролерів (англ. PLC – Programmable Logic Controller), що базуються переважно на простих алгоритмах керування, до більш сучасних – на основі технологій нечіткої логіки та штучного інтелекту.

У сучасній будівлі всі елементи в системі життєзабезпечення взаємодіють між собою, структури зв'язків елементів є ієрархічними, а кожен елемент у системі може бути, в свою чергу, самостійною системою, із своїми системними властивостями і зі своєю метою функціонування. Тому такі будівлі, без сумніву, можна розглядати, як складні технічні системи.

Керування складними системами принципово відрізняється від програмного керування, тобто переведення системи до бажаного стану тим чи іншим оп-

тимальним шляхом. Пояснюється це, передусім, тим, що поведження складних систем важко спрогнозувати, а визначити їй, тим більше, задати системі «оптимальний» шлях переходу до бажаного стану, практично неможливо. Тому САК складними системами, за змістом та механізмом дії, найближче до фізіологічних процесів збудження і гальмування, тобто зовнішнього і внутрішнього стимулювання. Доцільним ввижається застосування теорії нечітких множин, що має справу з «людськими знаннями», які прийнято називати «експертною інформацією». Характерним для нечіткого керування є застосування якісних експертних знань для генерування керуючих впливів на об'єкт керування.

У нечіткому регуляторі, на основі бази правил, здійснюється формування логічного рішення – отримання нечіткої множини у формі результуючої функції приналежності. Всі системи керування з нечіткою логікою функціонують за єдиним принципом [4]: сигнали датчиків фазифікуються (перетворюються в нечіткий формат), обробляються, дефазифікуються та, у вигляді звичайних сигналів, подаються на виконавчі пристрої.

Методологія проектування автономного електропостачання будівлі повинна ґрунтуватись на системному аналізі споруди, як енергетичної системи з взаємопов'язаними елементами генерації, розподілу та споживання енергії. В цьому контексті, доцільно розглядати будівлю, як злагоджений живий організм, де одночасно та взаємоузгоджено функціонують різні підсистеми забезпечення комфорту та безпеки життєдіяльності, а головною енергією для цього виступає електрична енергія.

З метою ефективного та надійного забезпечення функцій автоматизації, які підвищують комфорт та безпеку, при значному зменшенні енергоспоживання, в сучасній практиці слід застосовувати інтелектуальні системи автоматизації будівель (англ. *BAS – Building Automation System*), також відомі як системи керування будівлями (англ. *BMS – Building Management Systems*) та системи керування енергоспоживанням будівель (англ. *BEMS – Building Energy Management Systems*) [1].

1. Моїсєєв В. Чотири роки повномасштабної війни та 64 масовані атаки на енергетику: основні цифри // *The Page*. 24 лютого 2026. URL: <https://thepage.ua/ua/news-energy/chotiri-roki-povnomasshtabnoyi-vijni-ta-masovani-ataki-na-energetiku> (дата звернення: 25.03.2026).

2. Кравцов С., Жесан Р., Голик О., Зубенко В. Місце енергоефективних будівель із системами керування в розподіленій генерації енергії. *Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві* : збірн. тез допов. Всеукр. наук.-практ. on-line конф., м. Кропивницький, 13-14 листопада 2024 р. Кропивницький : ЦНТУ, 2024. С. 181-183. URL: <https://kntu.kr.ua/file/content/13789/zbirnyk-tez.pdf> (дата звернення: 25.03.2026).

3. Energy Performance of Buildings: Directive (EU) 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/31/oj/eng> (дата звернення: 11.04.2026).

4. Гостев В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Київ : Радиоаматор, 2008. 972 с. ISBN 978-966-96178-2-0.

НЕЙРОМЕРЕЖЕВА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДИНАМІКИ МІНІ-НАФТОПЕРЕРОБНОГО ЗАВОДУ

Хміль С. В., Білоус Н. В., Глушко А. К.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, hlushkoandriy@gmail.com

Міні-нафтопереробні заводи (міні-НПЗ) продуктивністю 0,05–1,0 млн тонн нафти на рік характеризуються нелінійністю процесів, значними транспортними запізненнями (15–90 с) та перехресними зв'язками між вузлами. Автоматизація більшості вітчизняних підприємств обмежується локальними ПД-контурами, що призводить до нестабільності фракційного складу дистилятів. Перспективним напрямом є нейромережеві системи автоматичного керування; необхідною передумовою їх синтезу є побудова точної ідентифікаційної моделі об'єкта.

Метою роботи є порівняльний аналіз п'яти архітектур нейронних мереж – *NARX* (*Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs*), *LSTM* (*Long Short-Term Memory*), *GRU* (*Gated Recurrent Unit*), *TCN* (*Temporal Convolutional Network*) та *MLP* (багатошаровий перцептрон) – для ідентифікації динаміки технологічних вузлів міні-НПЗ за комплексним критерієм «точність – обчислювальна ефективність – стійкість до варіації параметрів».

Об'єктом ідентифікації обрано модельний технологічний ланцюг (вузол підготовки сировини, атмосферна ректифікаційна колона (АРК) з нагрівальною піччю та стабілізаційна колона), що містить 10 каналів керування типу «аперіодична ланка першого порядку з запізненням» (*FOPDT*) зі сталими часу 45–540 с та транспортним запізненням 0–90 с. Загальна форма передаточної функції каналу:

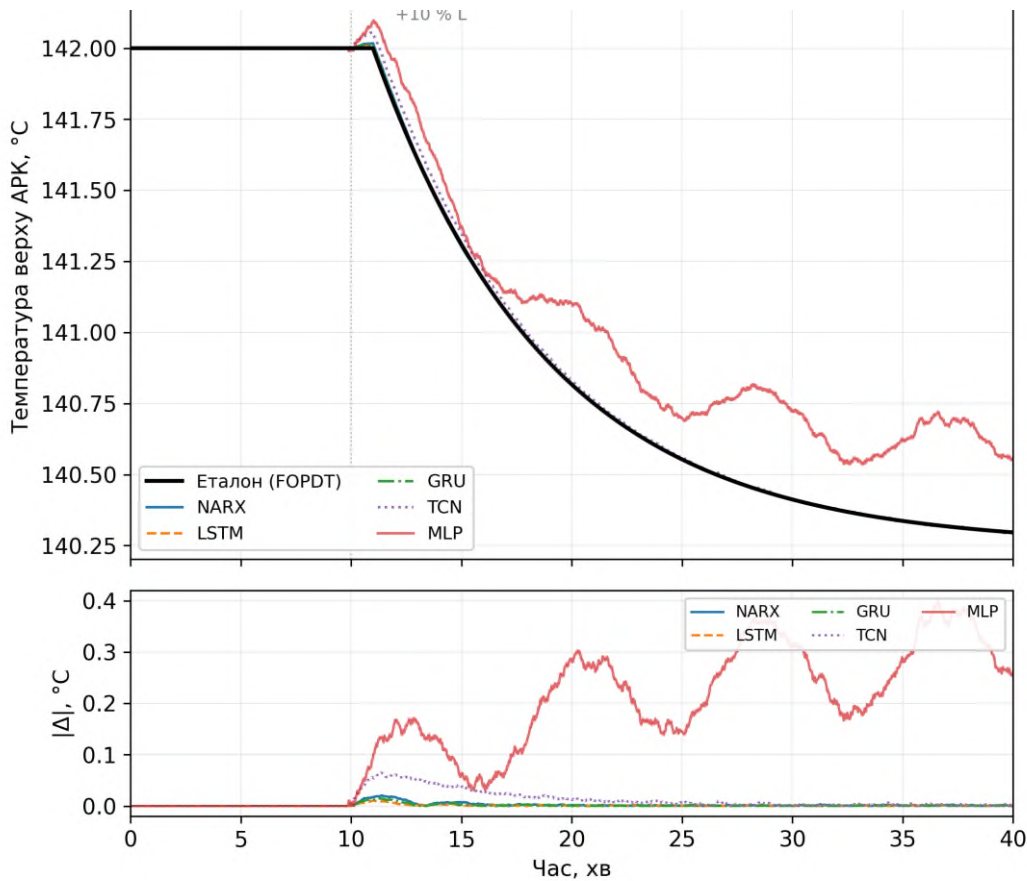
$$W(s) = K \cdot e^{-\tau s} / (T_a \cdot s + 1), \quad (1)$$

де K – статичний коефіцієнт підсилення каналу; T_a – стала часу, с; τ – транспортне запізнення, с; s – оператор Лапласа.

Імітаційний стенд реалізовано мовою Python 3.10 з бібліотекою SciPy (метод Рунге–Кутта RK45); паралельне моделювання у середовищі Matlab/Simulink R2023b підтвердило адекватність (розходження $\leq 0,003$ °C на інтервалі 3600 с). Навчальні вибірки згенеровано псевдовипадковим бінарним сигналом (*PRBS*). Навчання всіх архітектур виконано алгоритмом Adam ($lr = 0,001$; L^2 -регуляризація $\lambda = 10^{-4}$) у PyTorch 2.0. Для оцінки використано R^2 , MAE , а також інтегральні показники ISE та IAE у замкненій системі. Результати порівняння архітектур на еталонному каналі «витрата флегми $L \rightarrow$ температура верху АРК $T_{верх}$ » (10 000 навчальних і 2 000 тестових точок) зведено в таблицю.

Порівняння архітектур нейронних мереж для ідентифікації каналу « $L \rightarrow T_{верх}$ »

Показник	NARX	LSTM	GRU	TCN	MLP
Параметри, од.	1 247	4 865	3 720	2 890	638
R^2 (тест)	0,9996	0,9997	0,9997	0,9995	0,9981
MAE, °C	0,041	0,038	0,039	0,044	0,098
Інференс, мс/крок	0,12	0,45	0,35	0,18	0,08
ISE (збур. ± 5 %)	42,1	39,8	40,2	43,5	58,3
Сумарний бал (30)	26	19	22	20	20



Перехідні характеристики ідентифікаційних моделей п'яти архітектур при ступінчастому збуренні +10 % по витраті флегми (вгорі – вихід моделей; внизу – модуль похибки)

LSTM та *GRU* забезпечують найвищу точність ($R^2 = 0,9997$; $MAE = 0,038-0,039$ °C), але потребують у 3–4 рази більшого часу інференсу та кількості параметрів. При варіації τ на ± 20 % *NARX*, *LSTM* і *GRU* зберігають прийнятну точність, у *TCN* MAE зростає на 15–20 %, у *MLP* – на 40–50 %. За 30-бальним комплексним критерієм *NARX* набирає 26 балів – максимум серед п'яти архітектур. Двошарова мережа *NARX* (6–4 нейрони, *tanh*) забезпечує ідентифікацію всіх 10 каналів з $R^2 \geq 0,9996$, максимальною похибкою $\leq 0,074$ °C (менше 2,5 % від технологічного допуску ± 3 °C), часом інференсу 0,12 мс/крок і обсягом пам'яті ≈ 5 КБ/канал, що уможлиблює реалізацію ідентифікатора на промислових контролерах класу ARM Cortex (200–600 МГц) та обґрунтовує вибір *NARX* як базової архітектури для нейромережевих регуляторів малотоннажних виробництв.

1. Dunaeva T. A. Neural network-based prediction of dissolved salt concentration in reverse osmosis permiaat // Наука і техніка сьогодні №13(54), 2025, С. 1637-1649. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13\(54\)-1637-1649](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-13(54)-1637-1649).

2. Winlow, William & Johnson, Andrew. (2026). The Multi-Biophysical Nature of Computation in Brain Neural Networks. OBM Neurobiology. 010. 10.21926/obm.neurobiol.2602331.

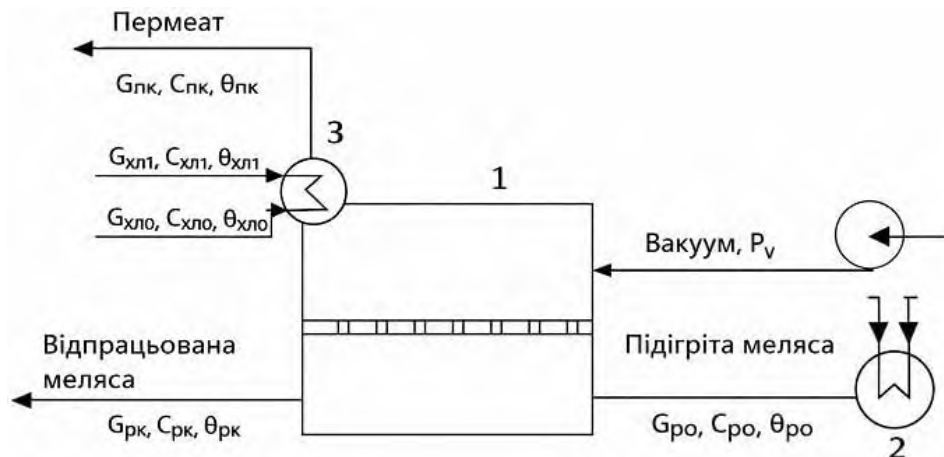
3. Sheela, G. Arockia & .S, Vimala. (2025). Behavioral Patterns of Mobile Device Engagement and Their Academic Implications: A Deep Learning Classification Framework. International Journal of Science and Mathematics Education. 02. 225-241. 10.63680/ijssate1125025.019.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВАКУУМНОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ БІОЕТАНОЛУ

Алексєєнко Д. О., Ладієва Л. Р.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, aleksieienko.daria@gmail.com

Метою роботи є побудова математичної моделі мембранного модуля, ефективної для подальшого проектування систем керування процесами МД. У модуль подається підігріта меляса (G_{po} , c_{po} , θ_{po}), частина якої переходить у парову фазу та проходить крізь мембрану. Відпрацьований розчин відводиться як концентрат (G_{pk} , c_{pk} , θ_{pk}), зі сторони пермеату створюється вакуум (P_d), що визначає інтенсивність масо-переносу. Пари конденсуються у теплообміннику з холодоагентом ($G_{хл}$, $c_{хл}$, $\theta_{хл}$), утворюючи пермеат (G_{dk} , c_{dk} , θ_{dk}). Основними параметрами процесу є витрати, температури та теплоємності потоків, тиск пермеату і теплота пароутворення r , які визначають тепловий режим, енергетичні витрати та ефективність перенесення етанолу через мембрану. Описаний процес зображено на рисунку структурно-параметричної схеми мембранного модуля.



Структурно-параметрична схема мембранного модуля
1- мембрана, 2, 3-теплообмінник

Під час створення математичної моделі були прийняті наступні припущення:

- мембрана ідеальна, тобто гідрофобна, з однаковим радіусом пор та непошкодженим селективним прошарком;
- не враховано вплив поляризації температури та концентрації;
- неврахована розподіленість параметрів вздовж каналів мембранного модуля;
- ємністю мембрани знехтувано, через її незначну товщину порівняно з висотою каналів сировини та пермеату.

В результаті математичного моделювання процесу вакуумної дистиляції отримано наступні рівняння:

$$G_{\pi} \approx G_{\pi}^* + k_T(\theta_{pk} - \theta_{pk}^*) - k_P(P_p - P_p^*).$$

Теплові баланси для потоку меляси в мембранному модулі (2.1), вхідного теплообмінника (2.2), пермеатної зони (2.3) та холодоагенту (2.4):

$$C_p \frac{d\theta_{pk}}{dt} = G_{p0}c_p(\theta_{p0} - \theta_{pk}) - K_1(\theta_{pk} - \theta_{dk}) - r_v G_\pi \quad (2.1)$$

$$C_{pвх} \frac{d\Delta\theta_{p0}}{dt} = \Delta G_{пар} * r_{пар} - b G_{p0} c_p \Delta\theta_{p0} \quad (2.2)$$

$$C_d \frac{d\theta_{dk}}{dt} = K_1(\theta_{pk} - \theta_{dk}) - K_2(\theta_{dk} - \theta_{хлк}) + r_v G_\pi \quad (2.3)$$

$$C_{хл} \frac{d\theta_{хлк}}{dt} = G_{хл0} c_{хл}(\theta_{хл0} - \theta_{хлк}) + K_2(\theta_{dk} - \theta_{хлк}) \quad (2.4)$$

Після лінеаризації було виконано перехід до матричної форми:

$$X = \begin{bmatrix} \theta_{p0} \\ \theta_{pk} \\ \theta_{dk} \\ \theta_{хлк} \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} \Delta G_{пар} \\ \Delta P_p \end{bmatrix}$$

У просторі станів система має вигляд $\dot{X} = AX + BU$, де матриці А та В:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{G_{p0}c_p}{C_{pвх}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{G_{p0}c_p}{C_p} & -\frac{G_{p0}c_p + K_1 + r_v k_T}{C_p} & \frac{K_1}{C_p} & 0 \\ 0 & \frac{K_1 + r_v k_T}{C_d} & -\frac{K_1 + K_2}{C_d} & \frac{K_2}{C_d} \\ 0 & 0 & \frac{K_2}{C_{хл}} & -\frac{K_2 + G_{хл0}c_{хл}}{C_{хл}} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{r_{пар}}{C_p} & 0 \\ 0 & \frac{r_v k_p}{C_p} \\ 0 & -\frac{r_v k_p}{C_d} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Основними каналами моделі є «Витрата пари → температура меляси на виході», «Витрата пари → витрата пермеату», «Витрата пари → температура меляси на виході», «Витрата пари → температура меляси на виході». За каналами отримано передатні функції у нормалізованому вигляді.

Висновок: Роботу присвячено побудові математичної моделі мембранного модуля, ефективної для подальшого проектування систем керування процесами МД. На основі рівнянь теплового та матеріального балансів сформовано систему, що описує процеси у різних зонах апарата: потоці меляси, пермеатній зоні та контурі холодоагента. Перехід до стаціонарного режиму надає можливість визначити робочу точку системи. У результаті для мембранного модуля отримано передавальні функції, що дозволяють оцінити інерційність процесу, характер перехідних режимів і взаємний вплив теплових та масообмінних процесів.

1. Bendevis P., Ayman K., Laleg-Kirati T.-M. Computers and Chemical Engineering 133 (2020) 106622. Optimal model-free control of solar thermal membrane distillation system. 2020. Vol 133, 106622, ISSN 0098-1354, <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106622>.

2. Karam, A. M., & Laleg-Kirati, T. M. (2015). Real time optimization of solar powered direct contact membrane distillation based on multivariable extremum seeking. 2015 IEEE Conference on Control Applications (CCA). DOI:10.1109/cca.2015.7320841.

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ ПУНКТИВ У СКЛАДІ *SMART ENERGY SYSTEMS*

Здольник М. О., Степанець О. В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, zdolniknikita@gmail.com

Сучасний етап розвитку систем централізованого теплопостачання характеризується переходом до концепцій 4-го та 5-го поколінь (*4GDH/5GDH*) [1], що передбачають глибоку інтеграцію відновлюваних джерел енергії, зниження робочих температур теплоносія та активну участь споживачів у балансуванні мережі. Традиційні алгоритми автоматизації індивідуальних теплових пунктів (ІТП), що базуються на жорстких погодних графіках та локальному ПІД-регулюванні, не здатні ефективно реагувати на динамічні тарифи, обмеження потужності локальних мереж та потреби енергосистеми у гнучкості.

Розробка та математичне обґрунтування універсальної цільової функції для макрорівня керування ІТП, яка дозволяє мінімізувати експлуатаційні витрати при забезпеченні заданого рівня комфорту та дотриманні мережових обмежень, є актуальною задачею. Для реалізації інтелектуального керування пропонується дворівнева кіберфізична архітектура. Виконавчий рівень базується на класичних промислових контролерах (ПЛК), що забезпечують стабілізацію параметрів у реальному часі за допомогою ПІД-алгоритмів. Макрорівень реалізується у вигляді мультиагентної системи (МАС) [2] та призначений для формування та контролю високорівневих цілей функціонування ІТП.

Інтелектуальний агент об'єкта збирає дані про прогнози погоди, тарифи та стан мережі, після чого розраховує оптимальну траєкторію теплоспоживання на заданий горизонт планування. Центром стратегічного керування є багатокритеріальна цільова функція J_k (1), яка мінімізується на кожному кроці k планування:

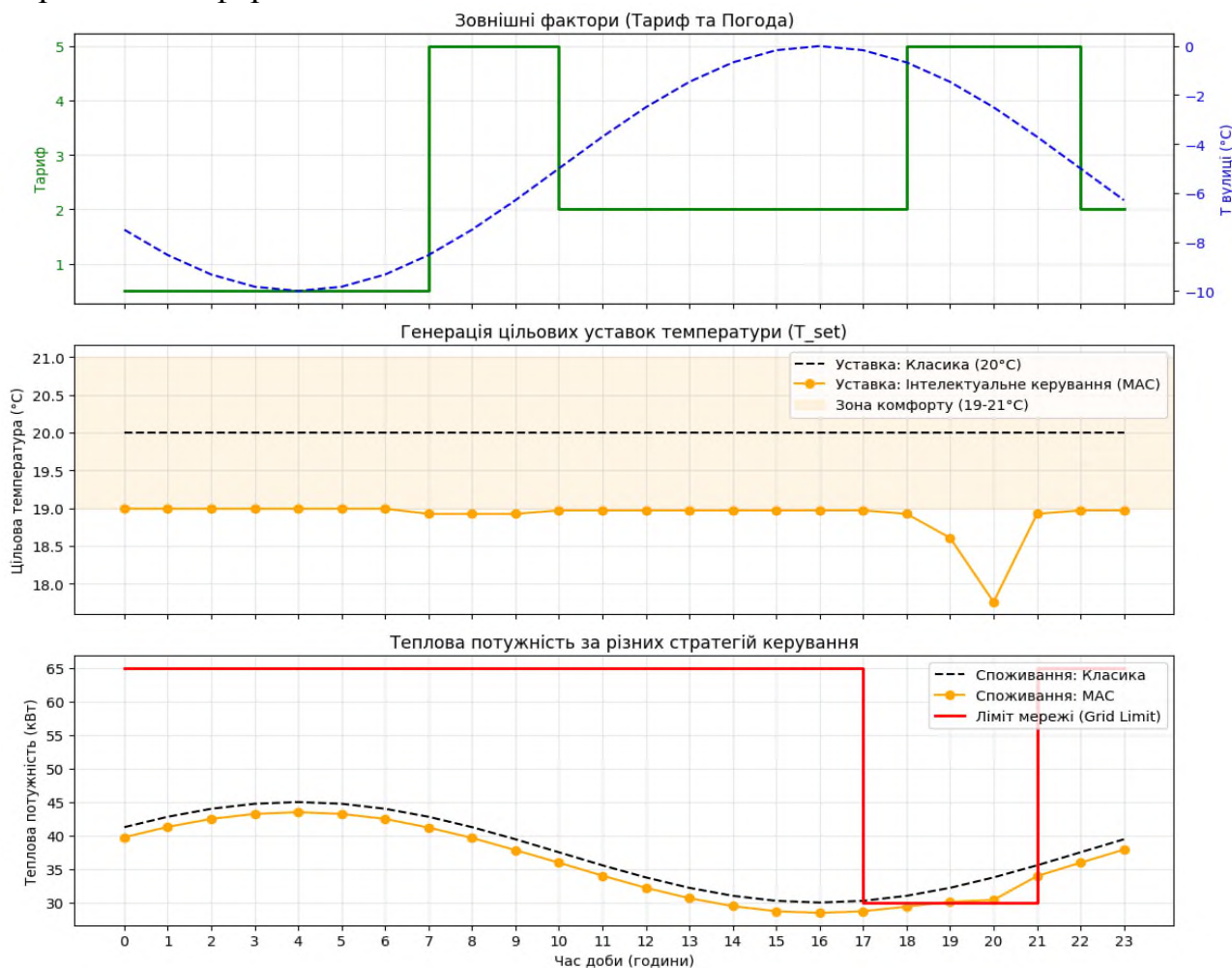
$$J_k = \omega_1 C_k + \omega_2 P_{dev,k} + \omega_3 P_{peak,k} + \omega_4 P_{ret,k} + \omega_5 P_{wear,k}, \quad (1)$$

де C_k – прямі витрати на енергоносії з урахуванням багатозонних тарифів; $P_{dev,k}$ – штраф за відхилення від цільової температури комфорту; $P_{peak,k}$ – штраф за перевищення лімітів потужності, встановлених оператором мережі; $P_{ret,k}$ – штраф за завищену температуру зворотної магістралі, що критично для ефективності теплогенеруючих установок; $P_{wear,k}$ – показник зносу обладнання, що обмежує надмірну кількість перемикачів виконавчих механізмів.

Врахування системою факторів, які лежать за межею сприйняття локальних контурів регулювання, забезпечується зміною вагових коефіцієнтів ω_i , що дозволяє динамічно змінювати поведінку технологічного об'єкта.

Аналіз результатів псевдодинамічного моделювання добового циклу роботи ІТП (див. рисунок) демонструє роботу алгоритму в умовах конфлікту цілей: необхідність дотримання ліміту потужності мережі ($P_{peak} \leq 30$ кВт) за одночасного підтримання комфорту. Встановлено, що при пікових навантаженнях інтелектуальна система здійснює оптимальну деградацію параметрів – допускає короткочасне зниження температури нижче нормативної межі (до 18,8 °С), щоб мінімізувати сумарний штраф цільової функції. На відміну від класичного керування, яке спричиняє

масивне порушення енергетичного ліміту, запропонований підхід утримує споживання в межах допустимого коридору, балансує між енергетичною стабільністю мережі та комфортом мешканців.



Результати псеводинамічного моделювання доби роботи ІТП: профілі зовнішніх збурень (а); генерація температурних уставок (б); споживання теплової потужності класичною системою керування та мультиагентною системою (в)

Доведено, що використання мультиагентного підходу дозволяє реалізувати стратегію активного керування попитом, трансформувати ІТП з пасивного споживача на активного учасника *Smart Energy System*, забезпечуючи зниження пікового споживання теплової енергії в критичні години. Встановлено, що в умовах жорстких мережевих обмежень запропонована цільова функція забезпечує найменш відчутне для споживача порушення температурного регламенту, на відміну від традиційних систем, які не здатні враховувати пріоритетність обмежень.

1. Baranchuk K., Liubarets O. Evolution of heating substation: from steam systems to thermal prosumers. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*. 2025. Vol. 53. P. 6–19. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.53.6-19>.

2. Zolnyk M. O., Stepanets O. V. Multi-agent approach to the architecture of local automatic control systems for industrial and residential heat supply facilities. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2025. Vol. 2, no. 4. P. 133–141. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.2/18>.

APPLIED APPLICATION OF SOLAR ENERGY TECHNOLOGIES IN THE EUROPEAN UNION FOR TRANSFERRING BEST PRACTICES TO UKRAINE

S. V. Zaichenko, A. R. Trachuk

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, atrachuk1990@gmail.com

The accelerated deployment of solar energy technologies across the European Union reflects a deep and systematic transformation of the energy sector toward sustainability, decentralization, and reduced carbon intensity. Over the past decade, EU member states have demonstrated a steady increase in installed photovoltaic capacity, supported by coherent regulatory frameworks, long-term policy consistency, and rapid technological advancement. This accumulated experience forms a solid analytical and practical foundation for transferring effective solutions to Ukraine, particularly in the context of current energy challenges and the necessity of ensuring resilience and independence of the national power system.

A defining feature of the European approach is the large-scale integration of distributed generation. In leading countries such as Germany, Spain, and the Netherlands, decentralized photovoltaic systems are actively promoted through a combination of feed-in tariffs, net billing schemes, investment subsidies, and tax incentives. This has enabled households, small enterprises, and local communities to become active participants in energy production, thus reshaping traditional consumption patterns. As a result, the energy system becomes more flexible, adaptive, and resistant to external disruptions. For Ukraine, the implementation of similar policy instruments could significantly intensify private investment flows into the renewable sector and create favorable conditions for the development of prosumer-based energy models.

In parallel, the European Union places strong emphasis on the modernization of energy infrastructure through the development of smart grids and energy storage systems. The integration of digital technologies, real-time monitoring tools, and automated control mechanisms allows for efficient coordination between generation and consumption. Battery storage solutions, in particular, play a critical role in mitigating the variability of solar energy and ensuring system stability. For Ukraine, the adoption of such approaches requires not only technological upgrades but also institutional reforms aimed at improving grid management and market flexibility.

From an economic perspective, the EU experience clearly demonstrates the ongoing reduction in the cost of photovoltaic technologies, driven by economies of scale, innovation, and competitive market dynamics. This trend significantly improves the financial attractiveness of solar projects and reduces the payback period for investments. Ukraine can capitalize on these developments by facilitating access to international financial instruments, encouraging localization of production processes, and simplifying administrative and permitting procedures. The creation of transparent and predictable market conditions will be essential for attracting both domestic and foreign investors.

Environmental and social dimensions further reinforce the importance of solar energy expansion. The increased use of photovoltaic systems contributes to a substantial decrease in greenhouse gas emissions, supports compliance with international climate commitments, and enhances overall environmental quality. Additionally, the renewable energy sector stimulates job creation, fosters technological development, and supports regional economic diversification. In Ukraine, these effects are particularly valuable in the context of post-crisis recovery, infrastructure rebuilding, and long-term sustainable development strategies.

Moreover, the alignment of Ukraine's energy policies with European standards and practices opens additional opportunities for integration into the broader European energy space. Harmonization of legislation, participation in joint energy initiatives, and cross-border cooperation can accelerate the adoption of advanced technologies and improve overall system efficiency. This strategic direction not only strengthens energy security but also contributes to the country's geopolitical and economic stability.

In summary, the European Union's practical experience in implementing solar energy technologies highlights the critical role of consistent policy support, technological innovation, and economic incentives. The careful adaptation and scaling of these best practices in Ukraine will enable a more rapid transition to renewable energy sources, enhance the reliability of the energy system, and ensure sustainable long-term growth. The integration of decentralized generation, smart infrastructure, and supportive regulatory mechanisms should become key priorities in shaping Ukraine's future energy landscape.

1. European Commission. EU Solar Energy Strategy. Brussels, 2022.

2. Zaichenko, S., Borichenko, O., Li, M. C., Shalenko, V., & Korol, S. (2025). Study of energy parameters of the installation for the implementation of the electrohydraulic effect. *Energetics: Economics, Technology, Ecology*, 3(81). <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2025.339792>

3. International Energy Agency. *Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028*. Paris, 2023.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИГИНУ КАНТИЛЕВЕРА В СЕНСОРІ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ВОДНЮ

Любименко О. М.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, e.n.lyubimenko@gmail.com

Актуальність розроблення чутливих, швидкодійних і селективних сенсорів водню зумовлена зростанням ролі водневих технологій в енергетиці, промисловості та системах безпеки. Одним із перспективних напрямів є використання паладієвих чутливих елементів, оскільки паладій характеризується високою здатністю до поглинання водню навіть за відносно низьких тисків і температур. Під час проникнення водню в паладій змінюється його структурний і напружено-деформований стан, що може бути використано як фізична основа для побудови сенсорних систем. Особливий інтерес становлять паладієві кантилевери, в яких взаємодія з воднем спричиняє вигин вільного кінця, а отже, створює можливість реєстрації концентрації водню за механічним відгуком чутливого елемента. У наданому матеріалі розглянуто математичний опис такого процесу, що пов'язує кінетику проникнення водню, формування концентраційного градієнта та часову залежність формозмінення кантилевера.

Принцип роботи запропонованого сенсорного елемента ґрунтується на односторонньому насиченні паладієвого кантилевера воднем. За таких умов водень проникає через одну поверхню зразка, тоді як протилежна поверхня вважається непроникною. Унаслідок цього в товщі паладію формується неоднорідний розподіл концентрації водню, який призводить до неоднакових деформацій у різних шарах матеріалу та спричиняє вигин кантилевера як консолі. Для кількісного опису деформації отримано співвідношення, що пов'язує стрілу вигину μ з різницею між концентрацією водню на відкритій поверхні c_s та середньою концентрацією в об'ємі зразка c_m :

$$\mu = 2R \sin^2 \frac{l}{2R} \approx \frac{l^2}{2R} = \frac{\alpha(c_s - c_m) l^2}{h}, \quad (1)$$

де c_s – концентрація водню на відкритій поверхні, c_m – середня концентрація у зразку, R – радіус кривизни, l – довжина зразка, h – товщина кантилевера.

Згідно з цією моделлю вигин прямо пропорційний коефіцієнту концентраційного розширення, квадрату довжини кантилевера та різниці концентрацій, а також обернено пропорційний товщині зразка. Саме це співвідношення покладено в основу порівняння теоретичних і експериментальних результатів.

Для опису кінетики процесу використано дифузійне рівняння для концентрації атомарного водню в пластині з урахуванням початкової та граничних умов:

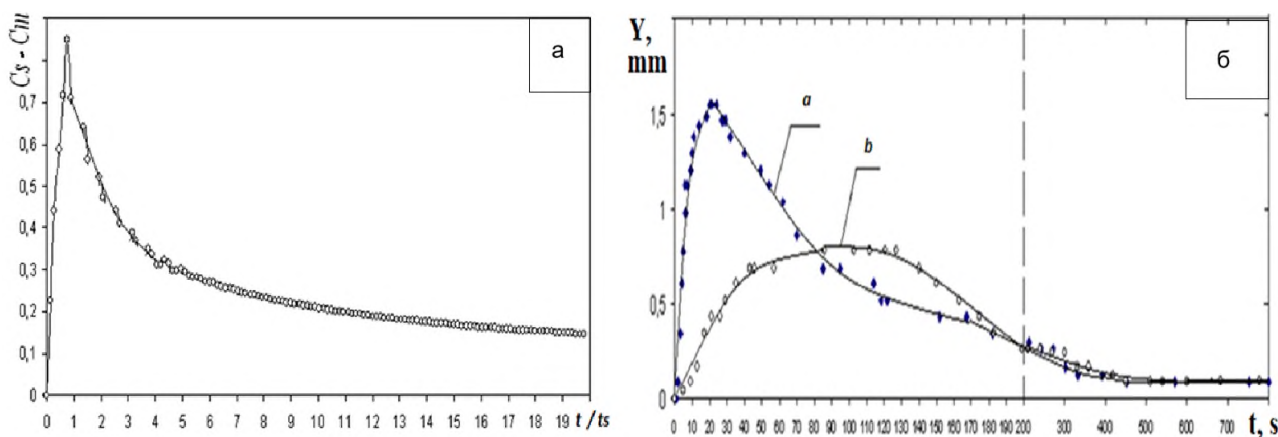
$$\frac{dc(x,t)}{dt} = D_{\text{eff}}(c) \frac{d^2c(x,t)}{dx^2}, \quad 0 \leq x \leq h \quad \text{та} \quad 0 \leq t \leq \infty, \quad (2)$$

де $D_{\text{eff}} = D_0 \left[1 - \frac{4Tc}{T} c(1-c) \right]$ ефективний коефіцієнт дифузії, який залежить від температури та концентрації, що дає змогу враховувати особливості масоперенесення водню в системі паладій–водень.

Початкова умова відповідає відсутності водню в зразку перед початком експерименту. На проникній поверхні густина потоку визначається різницею між фактичною та рівноважною концентраціями водню. На протилежній поверхні приймається умова нульового потоку.

Така постановка задачі адекватно відображає реальні умови роботи сенсорного елемента, коли вхід водню здійснюється лише з одного боку, а інший бік виконує роль бар'єра.

Одержані аналітичні оцінки дозволяють пояснити характерну немонотонну форму часової залежності формозмінення чутливого елемента. На початковому етапі після подачі водню спостерігається швидкий вигин кантилевера, зумовлений різким зростанням концентрації водню біля відкритої поверхні. Надалі формується максимум або плато, після чого починається повільне зменшення прогину. Таким чином, механічний відгук паладієвого кантилевера безпосередньо відображає еволюцію просторового градієнта концентрації водню. Встановлено, що максимальне відхилення пропорційне рівноважній концентрації $c_e(P,T)$. Чисельне інтегрування підтвердило правильність асимптотичних оцінок і дозволило відтворити часову залежність вигину кантилевера (рисунок,а) для конкретних значень параметрів.



Числовий розрахунок (а), експериментальна та (б) часова залежності вигину паладієвого кантилевера за температури 180 °С

Експериментальна перевірка моделі (рисунок,б) для паладієвого кантилевера при температурі 180 °С і підвищенні тиску водню до 0,0145 МПа показала, що максимальний вигин становить 1,5 мм і досягається приблизно за 21 с. Показано також, що збільшення часу напуску водню до 98 с зміщує максимум вигину в область більших часів і зменшує його приблизно вдвічі, що узгоджується з уточненими розрахунками, в яких рівноважна концентрація розглядається як функція часу.

Отже, проведений експеримент підтвердив достовірність розробленої математичної моделі, яка дозволяє характеризувати динаміку вигину й розпрямлення паладієвого кантилевера при насиченні воднем, а також створює підґрунтя для кількісної оцінки швидкості проникнення водню та впливу дифузійних і поверхневих обмежень на процес деформування.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ ПАРНИКОВОГО ГОСПОДАРСТВА ЯК БАГАТОВИМІРНОГО ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Антоненко В. О., Ладієва Л. Р.

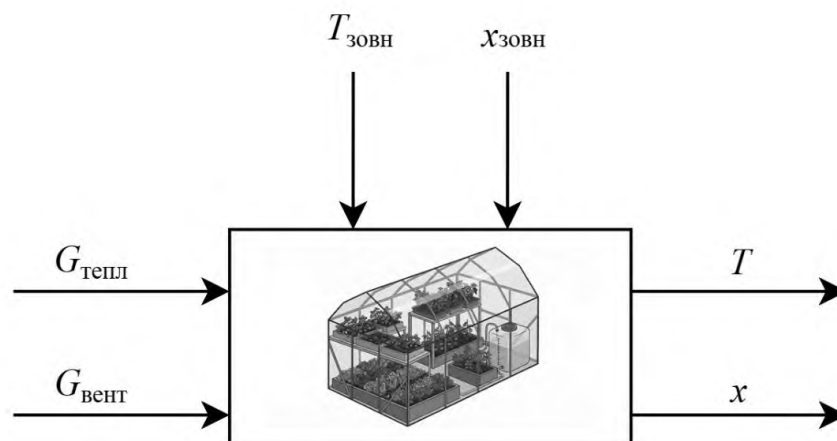
КПІ ім. Ігоря Сікорського, ant.veronka@gmail.com

Парникове господарство є складним об'єктом керування, якість функціонування якого визначається здатністю підтримувати задані параметри мікроклімату за змінних зовнішніх умов. Актуальність системи керування процесом формування мікроклімату у теплиці зумовлена потребою забезпечення необхідних температурного та вологісного режимів за енергоефективного функціонування системи. Одним із ключових етапів дослідження такого об'єкта є побудова математичної моделі. У роботі математичну модель мікроклімату теплиці побудовано на основі рівнянь теплового та вологісного балансу повітряного об'єму [1, 2]. Основними регульованими величинами прийнято температуру повітря T та вологовміст повітря x , керувальними впливами – витрату теплоносія $G_{\text{тепл}}$ і витрату вентиляційного повітря $G_{\text{вент}}$, а основними збуреннями – температуру зовнішнього повітря $T_{\text{зовн}}$ і вологовміст зовнішнього повітря $x_{\text{зовн}}$.

Теплицю розглянуто як багатовимірний об'єкт керування, оскільки кожен керувальний вплив змінює одразу декілька параметрів мікроклімату. Найбільш виражений перехресний вплив має вентиляція, яка одночасно змінює температурний, вологісний і газовий режими внутрішнього середовища. У структурно-параметричній схемі об'єкта, наведеній на рисунку, змінні подано у векторному вигляді:

$$u(t) = [G_{\text{тепл}}(t); G_{\text{вент}}(t)], d(t) = [T_{\text{зовн}}(t); x_{\text{зовн}}(t)], y(t) = [T(t); x(t)],$$

де $u(t)$ – вектор керувальних впливів; $d(t)$ – вектор збурень; $y(t)$ – вектор вихідних параметрів.



Структурно-параметрична схема теплиці як об'єкта керування

Загальний баланс для повітряного об'єму у теплиці записують як суму надходжень та втрат теплоти через конвекцію, вентиляцію, випромінювання та фазові переходи:

$$V\rho_{\text{пов}}c_{\text{пов}}\frac{dT}{dt} = Q_{\text{опал}} - Q_{\text{огор}} + Q_{\text{вент}} + Q_{\text{радіац}} + Q_{\text{сонце}} + Q_{\text{свд}} + Q_{\text{фаз}},$$

де V – об’єм повітря у теплиці, м³; $\rho_{\text{пов}}$ – густина повітря, кг/м³; $c_{\text{пов}}$ – питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К); T – температура повітря у теплиці, К; t – час, с; $Q_{\text{опал}}$ – теплота, що надходить від системи опалення, Дж/с; $Q_{\text{огор}}$ – втрати теплоти через огороження, Дж/с; $Q_{\text{вент}}$ – вентиляційний теплообмін, Дж/с; $Q_{\text{радіац}}$ – радіаційний теплообмін, Дж/с; $Q_{\text{сонце}}$ – сонячні теплові надходження, Дж/с; $Q_{\text{свд}}$ – тепловиділення від штучного освітлення, Дж/с; $Q_{\text{фаз}}$ – теплота фазових переходів вологи, Дж/с.

У цьому рівнянні враховано основні фізичні процеси, що формують мікроклімат повітряного об’єму теплиці.

У статичному режимі досліджено вплив витрати теплоносія та витрати вентиляційного повітря на температуру і вологовміст повітря. Показано, що збільшення витрати теплоносія приводить до зростання рівноважної температури, а зміна вологовмісту має опосередкований характер через температурний підканал. Для вентиляції встановлено спадний характер впливу на температуру і вологовміст, а також зниження концентрації CO₂ зі збільшенням повітрообміну. Отже, вентиляція у моделі виступає не лише тепловим, а й масообмінним каналом керування мікрокліматом.

Після лінеаризації вихідних нелінійних рівнянь в околі робочої точки отримано передавальні функції за каналами «витрата теплоносія – температура повітря», «витрата теплоносія – вологовміст повітря» та «витрата вентиляційного повітря – концентрація CO₂». У повній моделі додатково враховано вологість ґрунту, фотосинтетичну активність і газовий режим, однак основну увагу зосереджено на повітряному об’ємі теплиці як головному об’єкті керування.

Отже, побудована математична модель дає змогу описати основні та перехресні зв’язки у системі формування мікроклімату парникового господарства та може бути використана для подальшого дослідження статичних і динамічних властивостей теплиці як об’єкта керування.

1. Boulard T., Baille A. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1993. Vol. 65. No. 3-4. P. 145-157.

2. Stanghellini C., de Jong T. A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1995. Vol. 76. No. 2. P. 129–148.

AI-BASED sEMG BIOSENSING SYSTEM FOR REAL-TIME ESTIMATION OF LOWER LIMB JOINT ANGLES IN REHABILITATION APPLICATIONS

Farid Kenas

University of Science and Technology Houari Boumediene, Algeria, kenasfarid@gmail.com

Keywords: sEMG biosensors, Joint angle estimation, Deep learning, Rehabilitation robotics, Artificial intelligence.

Surface electromyography (sEMG) has emerged as a key biosensing modality for capturing muscle activity and enabling advanced human–machine interaction in rehabilitation systems. However, accurate estimation of lower limb joint kinematics from sEMG signals remains a challenging task due to the nonlinear and dynamic nature of neuromuscular behavior.

In this work, an intelligent biosensing framework is proposed for real-time estimation of hip, knee, and ankle joint angles using a reduced set of sEMG sensors. The system combines a hybrid deep learning architecture integrating a Feedforward Artificial Neural Network (FFANN) and a Gated Recurrent Unit (GRU) to capture both nonlinear relationships and temporal dependencies of muscle activations. A muscle selection strategy is introduced to minimize sensor usage, requiring only three key muscles along with a gait phase detection input.

The proposed system is validated using a publicly available biomechanical dataset comprising multiple walking conditions and subjects. Experimental results demonstrate high estimation accuracy, achieving an average root-mean-square error (RMSE) of approximately $3,5^\circ$ and a correlation coefficient exceeding 0,96.

These results highlight the potential of AI-driven biosensor systems for efficient, low-cost, and accurate motion estimation in rehabilitation robotics and assistive technologies.

ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ ПНЕВМАТИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ТА ШВИДКОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПНЕВМАТИЧНОГО СИГНАЛУ

Сташкевич П. М., Лукінюк М. В.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, p.stashkevych@kpi.ua

Робота сучасних хімічної, нафтохімічної, металургійної, скловарної, гірничодобувної та інших галузей промисловості неможлива без застосування пневматичних засобів автоматизації (регуляторів, вторинних приладів, первинних і проміжних перетворювачів тощо). Разом з тим у пневмоавтоматиці часто використовуються також пневматичні генератори коливань, від стабільності роботи яких залежить якість функціонування пневматичних систем керування. Так само на стабільність роботи цих систем суттєво впливає швидкість розповсюдження пневматичних інформаційних і керувальних сигналів. Тому дуже важливо буває правильно визначити частоту коливань пневматичних генераторів та швидкість розповсюдження пневматичних сигналів. Для вирішення цих проблем можна використати вимірювальний п'єзоперетворювач тиску *MPX5999D*, цифровий осцилограф *DS02D15* та перероблене пневматичне реле ПІР.3 (або ПІР.1) системи елементів УСЕППА. Схема дослідної установки для визначення частоти пневматичного генератора наведена на рис. 1, а результати дослідження – на рис. 2.

Під час дослідження використовувались два незалежні канали, розташовані на деякій відстані, тому результати дослідження містять два графіки.

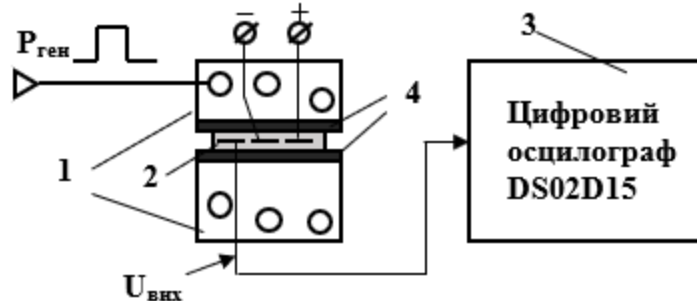


Рис. 1. Схема установки для дослідження пневматичного генератора:

1 – перероблене пневматичне реле ПІР.1 системи елементів УСЕППА; 2 – п'єзопневматичний перетворювач *MPX 5999D*; 3 – цифровий осцилограф *DS02D15*; гумотканинні мембрани



Рис. 2. Результати дослідження цифрового генератора

Як видно із результатів дослідження, період коливань зазначеного генератора дорівнює 7,4 с., тобто частота – 0,135 Гц.

Для визначення швидкості розповсюдження пневматичного сигналу було використано два перероблених пневматичних реле П1Р.1* з двома п'єзоперетворювачами тиску *MPX 5999D* та цифровий осцилограф *DS02D15*. Схема дослідної установки для визначення швидкості розповсюдження пневматичного сигналу наведена на рис. 3, а результати дослідження – на рис. 4.

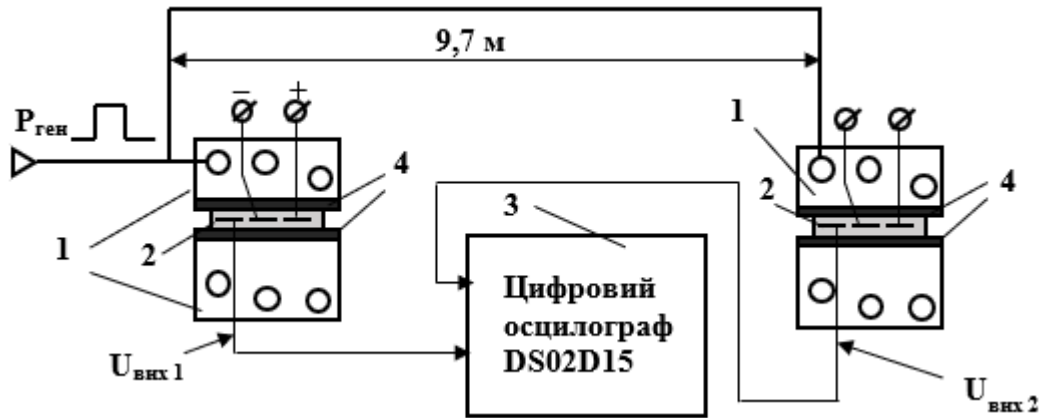


Рис. 3. Схема для визначення швидкості розповсюдження пневматичного сигналу

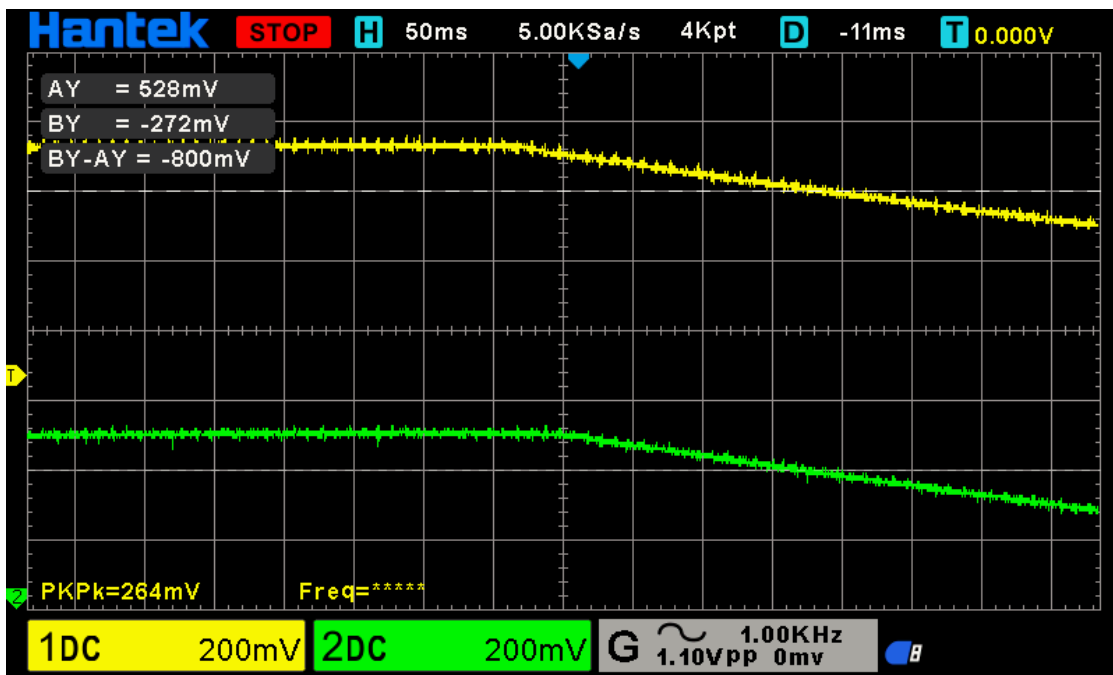


Рис.4. Результати визначення швидкості розповсюдження пневматичного сигналу

Як видно із результатів дослідження, запізнення розповсюдження другого сигналу складає приблизно 30 мс, що цілком збігається з теоретичним розрахунком (29, 21 мс) для довжини пневматичного каналу 9,7 м.

* Ибрагимов И. А. Элементы и системы пневмоавтоматики [Текст]: Учебник для вузов по спец. «Автоматизация и комплексная механизация хим.-технол. процессов» – 2-е изд., перераб. и доп. / Ибрагимов И. А., Фарзани Н. Г., Илясов Л. В. – М.: Высш. шк., 1985. – 544 с.: ил.– Библиогр.: с. 71.– 6000 экз.

ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ НА ПЕРЕВІРКУ ЦІЛІСНОСТІ У СИСТЕМАХ ГЕНЕРАЦІЇ ДОПОВНЕНИХ ПОШУКОМ ЧЕРЕЗ ЯКІРНИЙ ВІДБІР

Андрощук М. В.

Національний університет «Києво-Могилянська академія», maxym.androshchuk@ukma.edu.ua

Зростання популярності архітектур пошукової генерації (Retrieval-Augmented Generation, RAG) суттєво підвищило якість роботи великих мовних моделей (ВММ) з предметно-специфічними знаннями [1, 2]. Проте інтеграція інформації з гетерогенних джерел оголила нову проблему: завантажені у контекстне вікно документи часто містять застарілі, неповні або прямо суперечливі факти [3]. Коли ВММ отримує такий неузгоджений контекст, різко зростає ризик генерації «галюцинацій». Відповідно, попередня фільтрація та перевірка фактологічної цілісності видобутого контексту стають обов'язковим етапом для побудови надійних систем.

Одним із критичних етапів роботи сучасних RAG-систем є перевірка фактологічної узгодженості видобутого контексту [4]. Основним механізмом для вирішення цієї задачі є NLI (Natural Language Inference – логічне виведення природною мовою). Це завдання класифікації, яке визначає логічний зв'язок між двома фрагментами тексту: чи підтверджують вони один одного (слідування), чи конфліктують (суперечність), чи є незалежними (нейтральність). Стандартний підхід передбачає попарне порівняння всіх фрагментів знань (pairwise NLI), що потребує $K(K-1)/2$ викликів моделі, де K – кількість фрагментів. Для великих контекстних вікон це призводить до неприйнятних затримок та високих фінансових витрат. У роботі досліджується гіпотеза про те, що використання центрального «якоря» дозволяє суттєво оптимізувати цей процес.

Запропонований алгоритм базується на виборі одного або декількох «якірних» фрагментів, відносно яких перевіряються всі інші елементи контексту. Ключовим етапом є вибір якоря на основі лексичної центральності (коефіцієнт Жаккара): обирається фрагмент із найбільшим середнім показником перетину токенів з усіма іншими текстовими блоками в батчі.

Розроблене програмне рішення дозволяє динамічно перемикатися між стратегіями. Перша – це фіксований якір – перевірка всіх блоків лише відносно одного центрального якоря. Друга – адаптивний якір – вибір кількості якорів для NLI-перевірок на основі щільності конфліктів і кількості пар узгодженості; за потреби застосовується відбір якорів з урахуванням різноманітності та перевірка пар між самими якорями.

Дослідження проводилося на 15 наборах даних (батчах), які містили суперечності 14 типів (кількісні, темпоральні, семантичні тощо).

Результати порівняння з попарним базовим варіантом:

- NLI-запити: середня кількість викликів скоротилася з 7,60 до 3,27 на батч (зменшення на 57%) для режиму фіксованого якоря;
- часова затримка: середній час верифікації зменшився з 13,3 мс до 5,7 мс;
- якість визначення: значення F1-міри для базового якірного режиму склало 0,922 порівняно з 1,000 у попарному режимі.

Статистичний аналіз за критерієм Вілкоксона підтвердив значущість економії ресурсів. Для метрики F_1 різниця з попарним режимом не була статистично значущою, однак це не дозволяє формально стверджувати про повну еквівалентність якості якірного підходу. Встановлено, що для контексту обсягом $K=100$ етап NLI потребує 99 перевірок замість 4950 у попарному режимі.

Попри високу ефективність збереження ресурсів, запропонований метод має специфічні обмеження. Зниження $F1$ -міри до 0,922 у режимі фіксованого якоря зумовлене крайовими випадками (edge cases), коли локальний конфлікт виникає між двома периферійними фрагментами, які не мають прямого семантичного зв'язку з головним якорем. Статистичний аналіз за критерієм Вілкоксона підтвердив значущість економії ресурсів, проте для метрики $F1$ різниця з попарним режимом не була статистично значущою. Це не дозволяє формально стверджувати про абсолютну еквівалентність якості, але підтверджує високу практичну придатність методу.

Якірний підхід є практичним засобом зменшення вартості NLI-запити у RAG-системах, насамперед для наборів із низькою щільністю конфліктів, характерних для багатьох для RAG-сценаріїв. Лексична центральність є корисною евристикою для вибору референтних фрагментів, але для наборів із кількома незалежними кластерами суперечностей потрібне адаптивне збільшення кількості якорів або перехід до попарної перевірки. Отже, основний результат роботи полягає не в універсальній заміні попарної перевірки, а у зменшенні вартості її NLI-складової в межах валідованого робочого діапазону.

1. Lewis P. et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. arXiv preprint, 2020.
2. Gao Y. et al. Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey. arXiv preprint, 2024.
3. Yin X. et al. Truth Discovery with Multiple Conflicting Information Providers on the Web. IEEE TKDE, 2008.
4. Thorne J. et al. FEVER: A Large-Scale Dataset for Fact Extraction and Verification. NAACL, 2018.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ЦИФРОВОМУ НАУКОВОМУ ПРОСТОРІ

Середа Х. В., Євтушок І. А.

Інститут цифровізації освіти НАПН України, iitlt@iitlt.gov.ua

Глобальна трансформація наукового простору та впровадження парадигми відкритої науки (*Open Science*) вимагає впровадження нових підходів до управління інформаційними потоками [1]. Вебресурси сучасних наукових установ перестають бути просто сховищами документів, перетворюючись на складні динамічні системи [2]. У цьому контексті системи штучного інтелекту (ШІ) та автоматизовані системи підтримки прийняття рішень (СППР) є критично важливими для забезпечення ефективної комунікації та поширення наукових знань.

Основною проблемою управління цифровими дослідницькими інфраструктурами є надмірний обсяг неструктурованих даних за одночасної обмеженості аналітичних ресурсів. В умовах воєнного стану та значних регіональних диспропорцій в Україні, академічна спільнота потребує інструментів, які б дозволили мінімізувати вплив людського фактора та автоматизувати стратегічне планування на основі об'єктивних показників.

Традиційні методи оцінювання роботи наукових вебресурсів часто обмежуються лише кількісними показниками відвідуваності, що не дає змоги системно оцінити *FAIR*-відповідність. Виникає гостра потреба у впровадженні інтелектуальних СППР, які базуються на аналізі великих масивів даних для оптимізації управління цифровим контентом.

Інтелектуалізація систем підтримки рішень передбачає перехід від простої фіксації статистики до змістовного аналізу взаємодії користувачів із цифровим контентом. Сучасна СППР у науковій установі має будуватися на інтегрованих алгоритмах, що здатні розпізнавати патерни поведінки та прогнозувати майбутні інформаційні потреби дослідників.

Процес трансформації даних в управлінське рішення в таких системах базується на багаторівневому аналізі:

1. *Етап інтелектуальної диференціації*: система автоматично класифікує джерела трафіку та типи запитів, відокремлюючи цільову наукову аудиторію від випадкових звернень. Це дозволяє точно оцінювати рівень інтернаціоналізації досліджень та глобальне охоплення результатів.

2. *Аналітична діагностика*: ШІ-компоненти системи проводять перевірку гіпотез щодо ефективності структури ресурсу. Наприклад, аналізується відповідність метаданих запитам пошукових систем та зручність навігації. Висока видимість наукових статей у глобальних базах даних стає прямим показником якості цифрового управління.

3. *Вибір стратегії оптимізації*: на основі отриманих висновків система пропонує варіанти адаптації ресурсу – від зміни технічної архітектури до впровадження нових інтерактивних сервісів для науковців.

Особливого значення в архітектурі сучасних СППР набуває здатність системи до самонавчання на основі накопиченого масиву історичних даних. Інтелектуальні компоненти аналізують не лише поточну активність, а й виявляють довгострокові тренди у споживанні наукового контенту, що дозволяє прогнозувати попит на конкретні галузеві дослідження. Це стає фундаментом для прогностичного моделювання розвитку наукового середовища, де система самостійно визначає проблемні місця у поширенні інформації.

Важливою функцією інтелектуального аналізу є також верифікація достовірності та цілісності даних, що циркулюють у цифровій екосистемі установи. Автоматизована діагностика дозволяє виявляти аномалії в поведінці користувачів, що може свідчити про технічні помилки або некоректну роботу алгоритмів індексації. Завдяки впровадженню адаптивних інтерфейсів, СППР здатна динамічно змінювати форму представлення результатів аналізу залежно від рівня доступу та потреб управлінського персоналу. Це забезпечує гнучкість прийняття рішень: від оперативного виправлення технічних помилок до стратегічного перегляду тематичної спрямованості вебресурсу. Таким чином, інтелектуальна система стає не просто допоміжним інструментом, а повноцінним аналітичним центром, що функціонує в режимі реального часу. В умовах дефіциту часу та кадрів така автоматизація дозволяє зберігати високу конкурентоспроможність наукової установи на міжнародному рівні. Впровадження подібних систем є логічним кроком до створення «розумних» бібліотек та архівів, де кожен об'єкт метаданих працює на підвищення загальної видимості наукової школи. Географічний моніторинг активності відвідувачів надає можливість коригувати інформаційну політику установи, орієнтуючись на найбільш перспективні міжнародні наукові центри. Це дозволяє забезпечити транскордонну доступність знань навіть за умов жорстких ресурсних обмежень.

Майбутнє інтелектуальних систем підтримки рішень пов'язане з використанням нейронних мереж для обробки природної мови (*NLP*) з метою автоматичного реферування наукових праць та створення інтерактивних візуальних панелей керування (*dashboard*). Такі панелі дозволяють керівництву установ бачити динаміку розвитку дослідницького середовища в режимі реального часу.

Отже, впровадження інтелектуальних систем у практику управління науковими ресурсами є необхідною умовою їх виживання та розвитку. Автоматизація аналітичних процесів дозволяє трансформувати певні цифри у стратегічні кроки, забезпечуючи інтеграцію вітчизняної науки у світову цифрову екосистему та підвищуючи ефективність використання кожної одиниці наукового контенту.

1. Відкриті цифрові системи в оцінюванні результатів науково-педагогічних досліджень / В. Ю Биков та ін. *Інформаційні технології і засоби навчання*, 2020. Вип. 75 (1). С. 294–315. DOI: <https://doi.org/10.33407/itlt.v75i1.3589>

2. Биков В. Ю., Спірін О. М., Пінчук О. П. Сучасні завдання цифрової трансформації освіти. Неперервна професійна освіта XXI століття: Вісник Кафедри ЮНЕСКО, 2020. № 1. С. 27–36. DOI: [https://doi.org/10.35387/ucj.1\(1\).2020.27-36](https://doi.org/10.35387/ucj.1(1).2020.27-36)

МЕХАТРОННИЙ ПІДХІД ДО АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ ПІДСИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО АПАРАТА

Любименко О. М., Штепа О. А., Алтухова Т. В.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Дрогобич, e.n.lyubimenko@gmail.com

Сучасні виробничі процеси потребують підвищення мобільності, енергоефективності та надійності зварювального обладнання. Особливої актуальності це набуває для малопотужних зварювальних апаратів, які часто експлуатуються поза межами стабільної електромережі, у змінних температурних умовах та при підвищених вимогах до безпеки. У таких умовах важливим завданням є не лише забезпечення живлення апарата, а й організація автоматизованого контролю стану його підсистем, здатного своєчасно виявляти відхилення робочих параметрів та запобігати аварійним режимам.

Таким чином, розроблена система може розглядатися як мехатронний модуль моніторингу і захисту зварювального апарата, у якому інформаційна, електронна та виконавча підсистеми функціонують узгоджено в межах єдиного контролю керування. Для збору й попередньої обробки експериментальних даних використано мікроконтролер *Arduino UNO*. Моделювання електронної частини системи виконано в середовищі *NI Multisim*, що дало змогу дослідити роботу схеми як в ідеалізованих, так і в наближених до реальних умовах експлуатації. На основі проведених розрахунків для розроблюваного пристрою обґрунтовано робочий діапазон зварювального струму 70–180 А, напругу на вихідних клеммах 25–40 В, напругу холостого ходу 43 В та орієнтовний ККД на рівні 90 %.

Запропонована система включає вузол живлення, плату готовності, силову плату, плату керування, плату контролю температури та пульт оператора. Її функціонування базується на двох компараторах: перший забезпечує автоматичне вмикання вентиляторів при досягненні температури 40 °С, другий формує сигнал «Перегрівання» при перевищенні 90 °С та ініціює вимикання контролера плати керування. Такий підхід дозволяє реалізувати елементи автоматичного захисту обладнання без участі оператора та підвищити надійність роботи інвертора.

Практичні випробування показали працездатність запропонованої системи в різних режимах. За температури навколишнього середовища 20–25 °С і зварювального струму 120–130 А вентилятори працювали циклічно, вмикаючись приблизно на 9–11 с із повторним запуском через 15–20 с. За температури 40–42 °С вентилятори працювали постійно, однак режим перегрівання не фіксувався навіть при збільшенні струму до 140 А. Також система зберігала стабільність роботи за нестабільної напруги мережі 170–200 В, що підтверджує доцільність її застосування в умовах реального виробництва та поза стаціонарними робочими.

Практична цінність результатів полягає також у можливості використання запропонованого рішення як основи для побудови мехатронних зварювальних пристроїв із функціями адаптивного моніторингу, сигналізації, термозахисту та розширення засобами «м'якого старту», стабілізації дуги й антизалипання.

LAPLACE-BASED LUMPED DISTURBANCE ESTIMATION FOR MODEL-FREE CONTROL OF A LOWER LIMB EXOSKELETON

Farid Kenas

University of Science and Technology Houari Boumediene, Algeria, kenasfarid@gmail.com

Keywords: Model-Free Control, Laplace Transform, Lumped Disturbance, iPID Controller, Exoskeleton, Robust Control.

This paper presents a model-free control strategy for a lower limb exoskeleton based on an ultra-local model and a Laplace Transform-based estimation of the lumped disturbance. The proposed approach aims to replace the complex nonlinear dynamic model of the exoskeleton with a simplified second-order ultra-local representation.

To ensure accurate trajectory tracking, an intelligent Proportional-Integral-Derivative (iPID) controller is designed. The performance of the proposed controller depends on the estimation of the lumped disturbance term, which represents unmodeled dynamics and external perturbations. In this work, a disturbance estimation method based on the Laplace Transform is developed. By transforming the system dynamics into the Laplace domain and eliminating the effect of unknown initial conditions, an analytical expression of the disturbance is obtained.

The estimated disturbance is integrated into the control law to compensate uncertainties and improve robustness. The stability and convergence of the closed-loop system are ensured through appropriate control design.

Simulation results demonstrate improved tracking performance and effective disturbance rejection compared to classical estimation methods such as Time Delay Estimation.

The proposed approach can be applied to robotic and assistive systems, particularly lower limb exoskeletons.

ЗМІСТ

«Кафедра технічних та програмних засобів автоматизації...»	3
1. Zghurskyi D. O., Sazonov A. Yu., Kuchkin O. M. Analysis of Factors Determining the Quality of Pharmacological Products in the Context of their Automated Control	5
2. Денисюк В. Ю., Гончарук Ю. В. Оптимізація та автоматизоване управління процесом комбінованої електрохіміко-механічної обробки сферичних поверхонь	7
3. Юденко В. В., Бугаєва Л. М. Прогнозувальна модель для розв'язання задачі автоматизації процесу виробництва технічного вуглецю.....	9
4. Денисюк В. Ю., Самутін О. В. Математичне моделювання процесу подрібнення цементного клінкеру.....	11
5. Корнієнко В. В., Складаний Д. М. Імітатор технології обміну даними з інтелектуальними датчиками.....	13
6. Кучменко Я. О., Савченко Т. В. Виявлення поведінкових аномалій у системах контролю та управління доступом на основі <i>DIGITAL TWIN</i>	15
7. Стороженко П. О., Плашихін С. В. Моделювання динамічного режиму скребкового холодильника в процесі виробництва мильних та вуглеводних мастил періодичним способом	17
8. Мохонько Д. А., Складаний Д. М. Математична модель контуру регулювання температурою у системі вентиляції.....	19
9. Курков В. В., Плашихін С. В. Автоматизація виробництва цукрового печива....	21
10. Гульчук А. А., Бугаєва Л. М. Використання машинного навчання в системі контролю рівня забруднення повітря бенzenом.....	23
11. Дорогий Я. Ю., Цуркан В. В. Застосування тензорних моделей для аналізу кіберзагроз у промислових <i>SCADA</i> -мережах	25
12. Бех В. В., Плашихін С. В. Автоматизація процесу виготовлення вина	27
13. Гаврилюк О. О., Ситніков О. В. Математичне моделювання динаміки процесу нагрівання у плавильнику капролактаму.....	29
14. Дорогий Я. Ю., Цуркан В. В. Робастні <i>AI</i> -моделі для прийняття рішень в умовах невизначеності технологічних процесів	31
15. Савченко Т. В., Ярощук Л. Д. Система підтримки прийняття рішень у виробництві фосфорної кислоти	33
16. Грицаєнко І. Ю., Ситніков О. В. Синтез та дослідження системи керування температурою в проточному реакторі	35
17. Мухін І. В., Лукінюк М. В. Перелік вхідних та вихідних сигналів систем автоматизації та його стандартизація	37
18. Аршанський Д. І., Степанець О. В. Моделювання елементів децентралізованих систем теплозабезпечення в концепції цифрових двійників	39
19. Герашенко В. В., Запорожець Ю. А. Моделювання статичного режиму ректифікаційної колони.....	41
20. Кагадій М. Ф., Квітка О. О. Моделювання сепаратора як об'єкту керування в технологічному процесі виробництва азотної кислоти.....	43
21. Цуркан В. О., Ярощук Л. Д. Архітектурні патерни багатокористувацької хмарної <i>SCADA</i> -системи для технологічних систем	45
22. Жук А. Р., Ситніков О. В. Синтез та дослідження робастної системи керування швидкістю електропривода.....	47

23. Темніков А. В., Темнікова О. Л. Застосування продукцій і нечіткої логіки для контролю знань в інтелектуальних навчальних системах	49
24. Канцур М. О., Запорожець Ю. А. Створення структурно-параметричної схеми підігрівача води	51
25. Карпенко В. С, Курбан С. В., Ющенко А. О., Коротинський А. П. Автоматизація процесів паяння у дрібносерійному виробництві: доступні рішення для малого бізнесу.....	53
26. Самолюк В. С., Квітка О. О. Задача автоматизації рекуператора повітря на базі мікроконтролера	55
27. Тріщ В. Р., Ковалюк Д. О. Керування підігрівом компонентів реакційної суміші в процесі три-риформінгу метану	57
28. Савула А. А., Коротинський А. П. Вплив критерію оптимізації на ефективність роботи системи керування на базі звукової дефектоскопії.....	59
29. Пахнюк А. О., Запорожець Ю. А. Створення структурно-параметричної схеми холодильника-конденсатора	61
30. Федотова М. О., Трушаков Д. В. Заворуєв Р. С., Голик О. П., Дідик О. К. Алгоритм синтезу системи спостереження вихідними сигналами багатовимірною теплового об'єкта.....	63
31. Носов А. О., Коржик М. В. Прогнозування змін середовища на основі генеративних моделей	65
32. Аблець А. В., Тронь В. В. Вразливість програмних датчиків контуру подрібнення до калібрувального дрейфу	67
33. Путятін Р. О., Цапар В. С. Ідентифікація статичного режиму електрозневіднювача нафти за дослідними даними.....	69
34. Бондаренко А. О., Тюріна Є. О. Задачі керування процесом виробництва вапняково-аміачної селітри в режимі нормальної експлуатації.....	71
35. Абрамова А. О., Полив'яний Д. М. Ідентифікація моделі керування процесу нейтралізації буферних стічних вод.....	73
36. Войтюк А. В., Мінчечков М. Ю., Кріг А. І. Нейромережевий регулятор атмосферної ректифікації міні-нафтопереробного заводу	75
37. Кохан О. В., Савченко В. Ю. Інтеграція гібридних моделей штучного інтелекту в системі підтримки прийняття рішень	77
38. Новицька Т. Л., Лабжинський Ю. А. Цифрові ресурси для FAIR-даних в галузі освітніх наук: огляд платформ та інструментів	79
39. Кільченко А. В., Ткаченко В. А. Моніторинг FAIR-відповідності вебресурсів наукової установи: від даних до управлінського рішення.....	81
40. Ковалюк Д. О., Счастлівцев Д. С. Архітектура хмарної платформи для керування роботизованими системами.....	83
41. Решиковець М. О., Повстяной О. Ю. Автоматизація технологічного процесу отримання діоксиду вуглецю та водяної пари за допомогою котлоагрегатів.....	85
42. Іванова С. М., Шиненко М. А. FAIR-дані в галузі освітніх наук: від підготовки до оприлюднення	87
43. Чінкуе Камелія. Аналіз підходів до побудови цифрових двійників поліграфічного обладнання	89
44. Чінкуе Паола. Інтерактивна поліграфія на основі технологій машинного зору та AR з використанням CV-алгоритмів.....	91

45. Кравцов С. В., Жесан Р. В. Застосування нечіткої логіки у системах керування енергоефективними будівлями.....	93
46. Хміль С. В., Білоус Н. В., Глушко А. К. Нейромережева ідентифікація динаміки міні-нафтопереробного заводу.....	95
47. Алексєєнко Д. О., Ладієва Л. Р. Математичне моделювання процесу вакуумної мембранної дистиляції у виробництві біоетанолу.....	97
48. Здольник М. О., Степанець О. В. Багатокритеріальна оптимізація роботи індивідуальних теплових пунктів у складі <i>Smart Energy Systems</i>	99
49. S. V. Zaichenko, A. R. Trachuk. Applied application of solar energy technologies in the European union for transferring best practices to Ukraine.....	101
50. Любименко О. М. Математична модель вигину кантилевера в сенсорі для виявлення водню.....	103
51. Антоненко В. О., Ладієва Л. Р. математичне моделювання мікроклімату парникового господарства як багатовимірного об'єкта керування.....	105
52. Farid Kenas. AI-based sEMG Biosensing System for Real-time Estimation of Lower Limb Joint Angles in Rehabilitation Applications.....	107
53. Сташкевич П. М., Лукінюк М. В. Вимірювання частоти пневматичного генератора та швидкості розповсюдження пневматичного сигналу.....	108
54. Андрощук М. В. Зниження витрат на перевірку цілісності у системах генерації доповнених пошуком через якірний відбір.....	110
55. Середа Х. В., Євтушок І. А. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень у цифровому науковому просторі.....	112
56. Любименко О. М., Штепа О. А., Алтухова Т. В. Мехатронний підхід до автоматизованого контролю стану підсистеми живлення зварювального апарата.....	114
57. Farid Kenas. Laplace-based Lumped Disturbance Estimation for Model-Free Control of a Lower Limb Exoskeleton.....	115

Наукове видання

**АВТОМАТИЗАЦІЯ
ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ – 2026**
**XII МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
МОЛОДИХ УЧЕНИХ, АСПІРАНТІВ І СТУДЕНТІВ**
АКІТ – 2026

Київ, 07 травня 2026 року

Матеріали конференції

В авторській редакції
Надруковано з оригінал-макета замовника

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна

Формат 60×84¹/₈. Папір офс. Гарнітура Times New Roman.
1 файл (4,5 Мб). Обл.-вид. арк. 8,02. Поз. 26-3-3-005.

Видавництво «Політехніка», КПІ ім. Ігоря Сікорського
вул. Політехнічна, 14, корп. 15,
м. Київ, 03056, Україна
тел. (044) 204-81-78

КПІ ім. Ігоря Сікорського
Видавництво «Політехніка»