УДК 004.9:681.5

Зіновчук О.Я., здобувач
Державний університет «Житомирська політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ВИРОБНИЧОЇ ЛІНІЇ

У сучасних умовах розвитку автоматизованого виробництва та впровадження концепції Industry 4.0 особливого значення набувають цифрові технології, спрямовані на підвищення ефективності, надійності та керованості технологічних процесів. Одним із перспективних напрямів модернізації промислових підприємств є застосування цифрових двійників, які дають змогу створювати віртуальні моделі реальних виробничих об'єктів, аналізувати їхній поточний стан, прогнозувати можливі відхилення та оптимізувати режими роботи обладнання.

Цифровий двійник виробничої лінії являє собою програмно-апаратну систему, що відображає реальний технологічний процес у цифровому середовищі. Така модель формується на основі даних, які надходять від датчиків, програмованих логічних контролерів, виконавчих механізмів, систем диспетчеризації та засобів виробничого обліку. Завдяки цьому цифровий двійник забезпечує постійний моніторинг стану обладнання, контроль параметрів технологічного процесу та можливість моделювання різних виробничих сценаріїв без безпосереднього втручання у роботу реальної лінії.

Актуальність застосування цифрового двійника зумовлена тим, що традиційні методи керування виробничими процесами часто не забезпечують достатньої швидкості обробки інформації, гнучкості прийняття рішень та точності прогнозування технічного стану обладнання. У багатьох випадках контроль роботи виробничої лінії здійснюється із суттєвою участю оператора, що підвищує вплив людського фактора та може призводити до несвоєчасного виявлення несправностей. Крім того, відсутність ефективних засобів прогнозної діагностики збільшує ризик аварійних зупинок, втрат продуктивності та додаткових витрат на технічне обслуговування.

Метою роботи є аналіз можливостей застосування цифрового двійника для оптимізації роботи автоматизованої виробничої лінії, підвищення її продуктивності, зменшення кількості аварійних зупинок та покращення якості керування технологічним процесом.

Для реалізації цифрового двійника виробничої лінії необхідним є поєднання кількох функціональних рівнів. На нижньому рівні розміщуються датчики, виконавчі механізми та контролери, які забезпечують збір первинної інформації про стан обладнання, швидкість руху конвеєрів, температуру, тиск, навантаження, вібрації, енергоспоживання та інші параметри. На середньому рівні здійснюється передавання та попередня обробка даних за допомогою промислових мереж, PLC-контролерів і SCADA-систем. На верхньому рівні функціонує програмна модель цифрового двійника, яка виконує аналіз отриманих даних, виявлення відхилень, прогнозування технічного стану та формування рекомендацій щодо оптимізації режимів роботи.

Особливе значення у функціонуванні цифрового двійника має використання IoT-технологій, систем збору даних, MES- та ERP-систем, а також алгоритмів штучного інтелекту. Застосування таких засобів дозволяє не лише відображати поточний стан виробничої лінії, а й прогнозувати майбутню поведінку системи. Наприклад, на основі аналізу зміни температури, вібрацій або навантаження електродвигунів можна визначити ймовірність виникнення несправності ще до моменту її критичного прояву.

Однією з головних переваг цифрового двійника є можливість реалізації прогнозного технічного обслуговування. На відміну від планового обслуговування, яке виконується через фіксовані проміжки часу, прогнозне обслуговування базується на фактичному технічному стані обладнання. Це дає змогу зменшити кількість необґрунтованих ремонтних операцій, своєчасно виявляти небезпечні тенденції та запобігати аварійним зупинкам виробничої лінії.

Ефективність роботи виробничої лінії з використанням цифрового двійника можна оцінити за узагальненим показником:

$$E = \frac{P}{T \cdot C}$$

де E – узагальнений показник ефективності роботи виробничої лінії; P – обсяг виготовленої продукції; T – час роботи системи; C – витрати, пов'язані з експлуатацією та технічним обслуговуванням обладнання.

Застосування такого показника дозволяє враховувати не лише продуктивність виробничої лінії, а й часові та ресурсні витрати, що є важливим для комплексної оцінки ефективності автоматизованої системи.

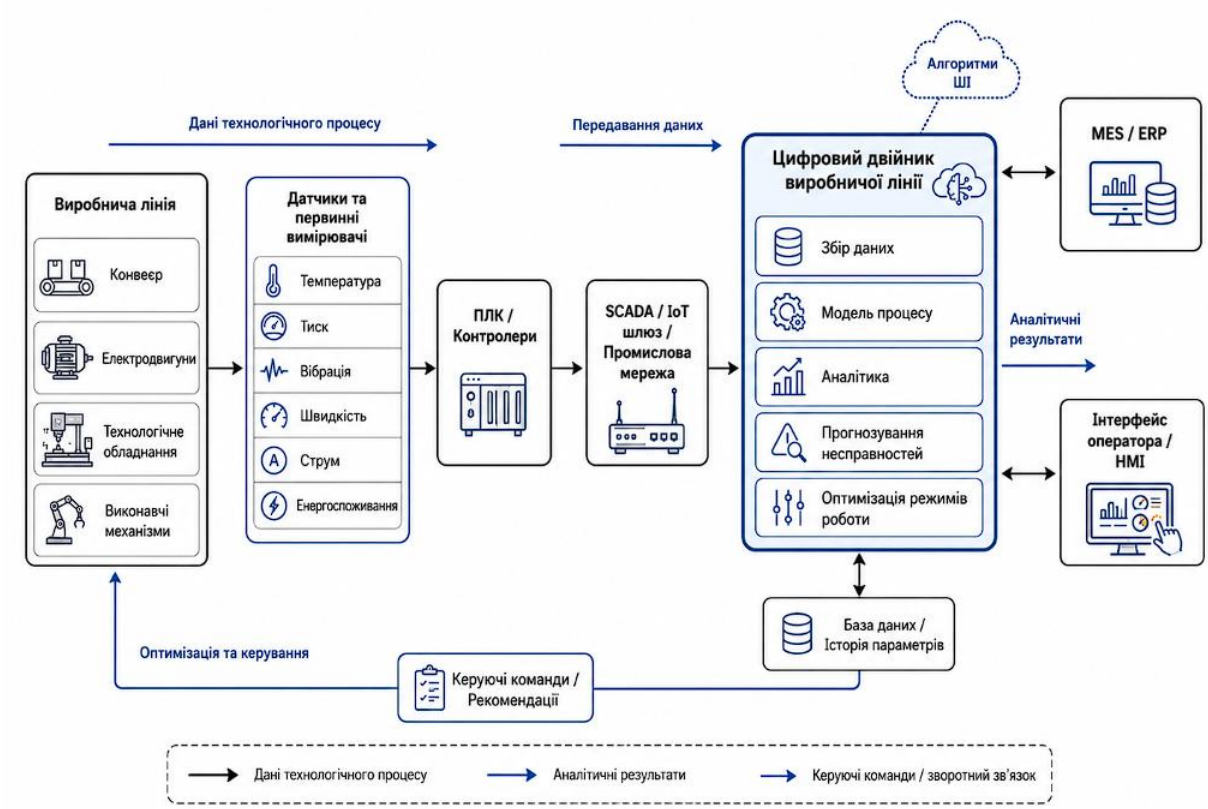

Рис. 1. Структурна схема цифрового двійника виробничої лінії

У структурній схемі цифрового двійника доцільно передбачити такі основні компоненти: виробниче обладнання, датчики контролю технологічних параметрів, PLC-контролери, систему збору та передавання даних, SCADA або MES-рівень, аналітичний модуль цифрового двійника, базу даних та інтерфейс оператора. Взаємодія цих елементів забезпечує безперервний обмін інформацією між реальною виробничою лінією та її цифровою моделлю.

Впровадження цифрового двійника дозволяє підвищити продуктивність виробничої лінії за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання, скоротити кількість аварійних зупинок, зменшити витрати на технічне обслуговування та підвищити якість продукції. Крім того, цифрова модель дає можливість проводити віртуальні експерименти, перевіряти нові режими роботи та оцінювати наслідки змін у технологічному процесі без ризику для реального виробництва.

Технологія цифрового двійника є важливим інструментом модернізації автоматизованих виробничих систем. Її застосування забезпечує підвищення ефективності керування виробничою лінією, покращення надійності обладнання, зменшення експлуатаційних витрат та створення умов для переходу підприємства до більш гнучкої, інтелектуальної та конкурентоспроможної моделі виробництва.

Список використаних джерел:

1. MDPI Sensors – Digital Twin Case Study on Automotive Production Line. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/22/18/6963

2. Haskell – Digital Twin is Key in Optimizing Struggling Bottling Line. URL: https://www.haskell.com/insights/optimizing-the-beverage-line-2/

3. ScienceDirect – Digital Twin Framework for Production Systems. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282712101026X

4. MDPI – The Concept of a Hierarchical Digital Twin. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/16/2/605

УДК 681.5:004.8

Антонюк О.С., здобувач
Державний університет «Житомирська політехніка»

АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ ПРОМИСЛОВОЇ ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Сучасні промислові печі є невід'ємною складовою металургійних, машинобудівних та інших виробничих процесів, де точність підтримання температурного режиму безпосередньо впливає на якість продукції та енергоефективність. З ускладненням технологічних процесів і зростанням вимог до точності регулювання традиційні підходи вже не забезпечують належного рівня керування, особливо в умовах нелінійності та нестабільності параметрів. На практиці широко використовуються класичні ПІД-регулятори, однак їх ефективність знижується при наявності запізнень у системі, змінних характеристик об'єкта та нелінійних залежностей. Вони потребують точного налаштування і часто не здатні забезпечити стабільну роботу при зміні режимів функціонування печі, що призводить до коливань температури, перевитрат енергії та зниження якості продукції.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи керування температурним режимом промислової печі на основі нечіткої логіки, яка забезпечує підвищення точності регулювання та адаптацію до змін умов роботи. Запропонована система базується на використанні нечіткого регулятора, що імітує логіку прийняття рішень досвідченого оператора. Вхідними параметрами є відхилення температури від заданого значення та швидкість її зміни. Вимірювання здійснюється за допомогою термопар або терморезисторів, а обробка сигналів – мікроконтролером або програмованим логічним контролером.

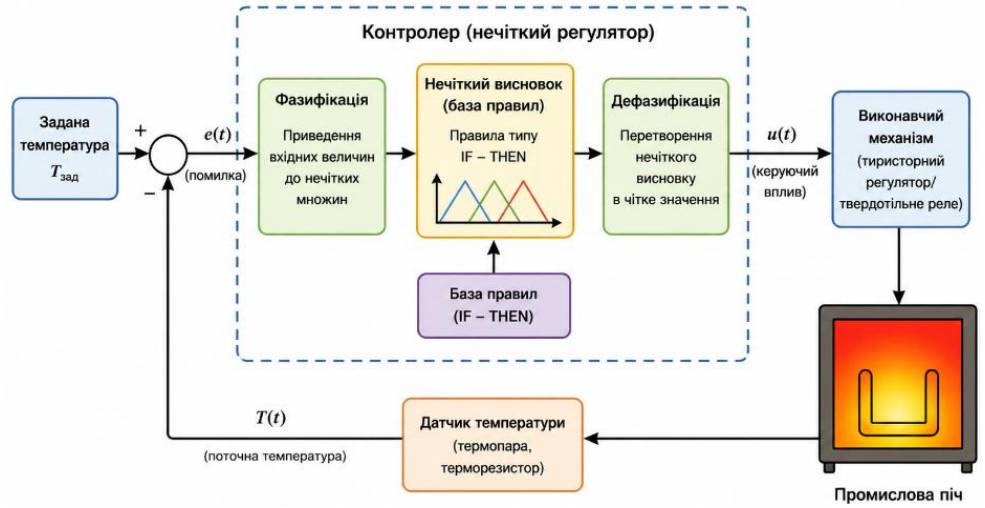

Рис.1. Структурна схема системи автоматизованого керування температурним режимом промислової печі на основі нечіткої логіки

Алгоритм керування включає етапи фазифікації, застосування бази правил типу «ЯКЩО–ТО» та дефазифікації. Такий підхід дозволяє враховувати не лише величину відхилення температури, але й динаміку її зміни. Наприклад, при незначному зниженні температури система формує помірний керуючий вплив, а при швидкому падінні температури на більш інтенсивний. Помилка регулювання визначається як різниця між заданою та поточною температурою, а керуючий сигнал формується на основі нечіткої залежності від цієї помилки та її зміни. Структурно система складається з датчика температури, контролера з реалізованим нечітким алгоритмом, виконавчих механізмів (тиристорних регуляторів або твердотільних реле) та об'єкта керування – промислової печі. Така архітектура забезпечує плавне регулювання потужності нагрівальних елементів. Застосування запропонованого підходу дозволяє підвищити точність підтримання температурного режиму, зменшити енергоспоживання та знизити вплив людського фактора. Система демонструє кращу стійкість до зовнішніх збурень і здатність адаптуватися до змін умов роботи. Використання нечіткої логіки в системах керування температурним режимом промислових печей є ефективним рішенням для складних нелінійних процесів і має перспективи широкого впровадження в сучасних автоматизованих системах керування.

Список використаних джерел:

1. 1. Zhang Y. et al. Temperature Control Method for Electric Heating Furnaces Based on Auto-Encoder and Fuzzy PI Control. Sensors. 2024. Vol. 24, No. 16. P. 5020.

УДК 621.316.1

Катков А.О., здобувач
Ткачук А.Г., к.т.н., доцент
Державний університет «Житомирська політехніка»

АНАЛІЗ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖАХ ТА МЕТОДИ ІХ ЗМЕНШЕННЯ

Ефективне функціонування сучасних розподільчих електричних мереж є однією з важливих умов забезпечення надійного, якісного та економічно доцільного електропостачання промислових і комунальних об'єктів. Одним із ключових показників ефективності роботи таких мереж є рівень втрат електроенергії, оскільки саме він безпосередньо впливає на собівартість електропостачання, енергоефективність підприємств та загальний техніко-економічний стан енергетичної інфраструктури. В умовах зростання вартості енергоресурсів, значного фізичного зношення електрообладнання та необхідності впровадження принципів Smart Grid задача аналізу й зменшення втрат електроенергії набуває особливої актуальності.

Розподільчі електричні мережі характеризуються складною структурою, значною кількістю споживачів, нерівномірним графіком навантаження та впливом різних зовнішніх і внутрішніх факторів. У таких умовах традиційні методи контролю втрат, що переважно базуються на періодичному знятті показників засобів обліку, не завжди дозволяють своєчасно виявляти локальні ділянки з підвищеними втратами. Крім того, значні інтервали між вимірюваннями ускладнюють аналіз динамічних змін навантаження, оцінювання якості електроенергії та визначення причин неефективної роботи окремих елементів мережі.

Втрати електроенергії в розподільчих мережах мають складну природу та поділяються на декілька основних груп. До технічних втрат належать втрати, зумовлені фізичними процесами передавання та перетворення електричної енергії, зокрема нагріванням провідників, втратами в обмотках і магнітопроводах трансформаторів, а також додатковими втратами, пов'язаними з несиметрією навантаження та наявністю вищих гармонік. Окремо виділяють витрати електроенергії на власні потреби підстанцій і допоміжного обладнання. Комерційні втрати виникають унаслідок похибок засобів обліку, неправильного зчитування показників або несанкціонованого споживання електроенергії.

Метою роботи є аналіз структури втрат електроенергії в розподільчих електричних мережах та обґрунтування методів їх зменшення на основі використання сучасних комп'ютеризованих систем моніторингу, керування та підтримки прийняття рішень.

Для досягнення поставленої мети доцільним є впровадження інтелектуальної системи аналізу втрат електроенергії, побудованої за трирівневою ієрархічною структурою. Нижній рівень такої системи утворюють інтелектуальні лічильники, аналізатори якості електроенергії, датчики струму, напруги та параметрів навантаження. Вони забезпечують безперервне або періодичне вимірювання основних електричних величин у вузлах мережі. Середній рівень реалізується на основі промислових контролерів, комунікаційних модулів та протоколів передавання даних, таких як Modbus TCP, MQTT або інші промислові мережеві рішення. На цьому рівні виконується збір, попередня обробка, фільтрація та передавання інформації до верхнього рівня системи.

Верхній рівень комп'ютеризованої системи забезпечує накопичення даних, їх аналітичну обробку, візуалізацію результатів та формування рекомендацій для оперативного персоналу. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення можна визначати ділянки мережі з підвищеними втратами, аналізувати добові та сезонні графіки навантаження, оцінювати якість електроенергії та прогнозувати можливі аварійні або неефективні режими роботи. Така структура відповідає загальній логіці побудови автоматизованих систем керування технологічними процесами, де поєднуються засоби вимірювання, контролери, виконавчі механізми, операторський інтерфейс і програмні алгоритми аналізу .

Особливе значення в процесі аналізу втрат має оцінювання якості електроенергії. Нелінійні споживачі, частотні перетворювачі, імпульсні джерела живлення та інше сучасне електронне обладнання можуть спричиняти появу вищих гармонік струму й напруги. Це, у свою чергу, призводить до додаткового нагрівання провідників, трансформаторів та електричних машин, збільшуючи технологічні втрати. Тому система моніторингу повинна не лише вимірювати активну та реактивну потужність, а й виконувати аналіз коефіцієнта потужності, рівня несиметрії фазних навантажень і гармонічних спотворень.

Одним із основних методів зменшення втрат електроенергії є компенсація реактивної потужності. Для цього можуть використовуватися автоматизовані установки компенсації реактивної потужності, які забезпечують підтримання коефіцієнта потужності на заданому рівні. Зменшення реактивної складової струму дозволяє знизити повний струм у лініях електропередачі, а отже, зменшити втрати активної потужності в провідниках. Іншим важливим напрямом є вирівнювання фазних навантажень у трифазних мережах. Несиметрія навантаження призводить до появи додаткових струмів у нульовому провіднику, нерівномірного завантаження фаз і збільшення втрат у мережевих елементах. Використання

автоматизованих систем контролю дає змогу виявляти ділянки з високим рівнем несиметрії та формувати рекомендації щодо перерозподілу навантаження між фазами.

До ефективних методів зниження втрат також належить автоматичне регулювання напруги під навантаженням. Підтримання оптимального рівня напруги дозволяє зменшити надлишкове енергоспоживання, забезпечити стабільну роботу електрообладнання та підвищити якість електропостачання. У поєднанні з системами моніторингу та прогнозування навантаження це дає змогу реалізувати більш гнучке керування режимами роботи розподільчої мережі.

Перспективним напрямом є використання комп'ютеризованих систем керування електричним навантаженням, які забезпечують активне управління попитом. Такі системи дозволяють згладжувати пікові навантаження, переносити частину енергоспоживання на періоди меншого навантаження мережі та зменшувати перевантаження трансформаторного й кабельного обладнання. У результаті зменшуються технологічні втрати, підвищується надійність електропостачання та знижується імовірність аварійних режимів.

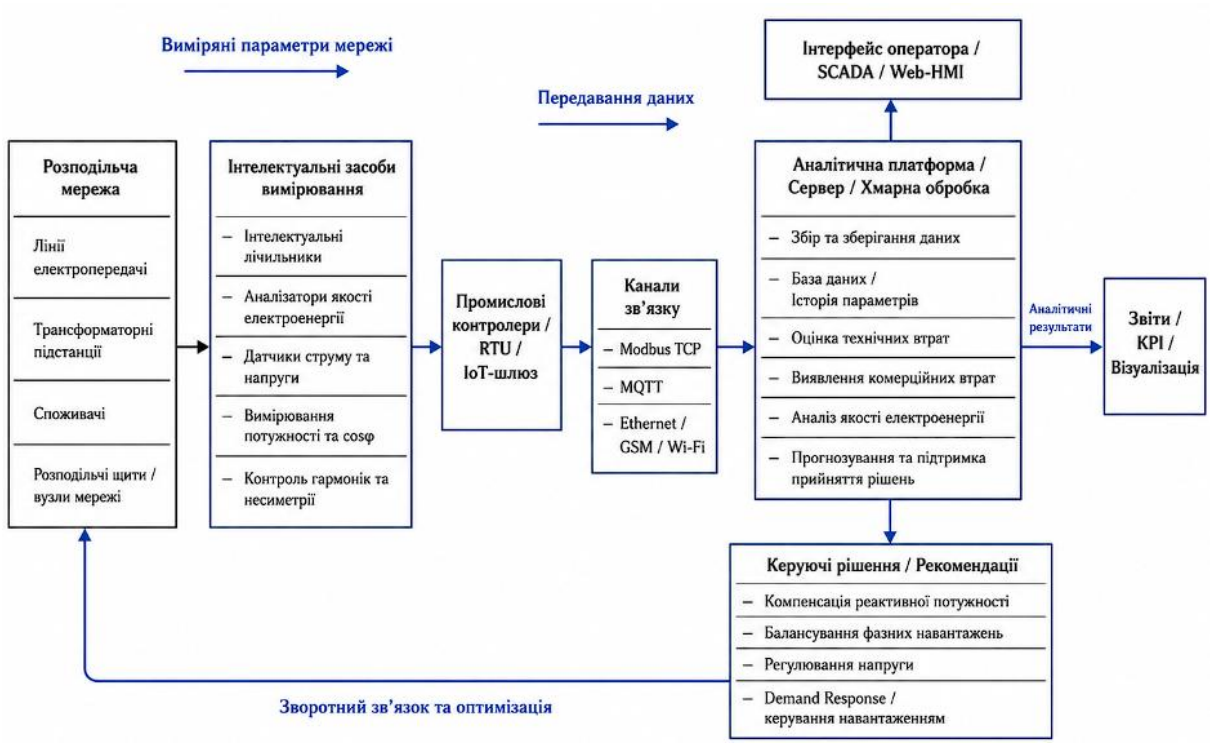

Рис. 1. Структурна схема комп'ютеризованої системи аналізу та зменшення втрат електроенергії в розподільчій мережі

У структурній схемі такої системи доцільно передбачити такі основні елементи: розподільчу електричну мережу, інтелектуальні лічильники, аналізатори якості електроенергії, промислові контролери, канали передавання даних, сервер або хмарну платформу обробки інформації, базу даних, аналітичний модуль, інтерфейс оператора та блок формування керуючих рекомендацій. Зворотний зв'язок від аналітичного модуля до об'єкта керування дозволяє реалізувати заходи з компенсації реактивної потужності, балансування навантаження, регулювання напруги та оптимізації режимів електроспоживання. Очікуваним результатом впровадження запропонованого підходу є зменшення технологічних втрат електроенергії, підвищення точності обліку, покращення якості електропостачання та зниження експлуатаційних витрат підприємства. За умови комплексного використання засобів моніторингу, автоматизованого керування та аналітичної обробки даних можливе зниження втрат електроенергії приблизно на 10–15 %, що має суттєве економічне значення для промислових і розподільчих енергетичних об'єктів.

Список використаних джерел:

1. Blinov I. et al. Smart Management of Energy Losses in Distribution Networks Using Deep Neural Networks. Energies. 2025. Vol. 18, No. 12. Article 3156. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/18/12/3156
2. Niste D.F. et al. Electricity Losses in Focus: Detection and Reduction Methods in Power Grids. Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 7. Article 3517. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/7/3517

УДК 681.5

Кондур С.В., здобувач
Ткачук Д.Ю., аспірантка
Державний університет «Житомирська політехніка»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ PID-, FUZZY- ТА MPC-РЕГУЛЯТОРІВ У ЗАДАЧАХ ПРОМИСЛОВОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ

У сучасних системах промислової автоматизації зростають вимоги до точності, швидкодії, стійкості та енергоефективності керування. Багато технологічних процесів характеризуються нелінійністю, запізненнями, змінними параметрами та впливом зовнішніх збурень, тому вибір ефективного регулятора є важливою умовою стабільної роботи обладнання. Найбільш поширеними залишаються PID-регулятори, які відзначаються простотою реалізації та достатньою ефективністю для лінійних і слабконелінійних об’єктів. Проте їх можливості обмежені у складних динамічних системах, особливо за наявності нелінійностей, запізнень і технологічних обмежень. Тому актуальним є порівняння PID-регуляторів із Fuzzy-регуляторами та MPC-регуляторами, що дозволяє визначити переваги, недоліки й доцільність застосування кожного підходу в промисловій автоматизації.

Метою роботи є порівняльний аналіз PID-, Fuzzy- та MPC-регуляторів з позиції їх застосування у задачах промислової автоматизації, а також визначення умов, за яких кожен із зазначених підходів є найбільш доцільним. PID-регулятор формує керуючий вплив на основі трьох складових: пропорційної, інтегральної та диференціальної. Пропорційна складова забезпечує реакцію системи на поточну похибку регулювання, інтегральна усуває статичну похибку, а диференціальна враховує швидкість зміни похибки та сприяє покращенню динамічних властивостей системи. Загальний вигляд закону PID-регулювання можна записати так:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

де u(t) – керуючий сигнал; e(t) – похибка регулювання; K_p – коефіцієнт пропорційної складової; K_i – коефіцієнт інтегральної складової; K_d – коефіцієнт диференціальної складової.

Основною перевагою PID-регулятора є простота практичного впровадження та наявність значного досвіду його застосування в промисловості. Такий регулятор ефективно працює у системах стабілізації температури, тиску, рівня, витрати, швидкості обертання електроприводів та інших технологічних параметрів. Водночас PID-регулятор потребує якісного налаштування коефіцієнтів, а при зміні властивостей об’єкта керування його параметри можуть втрачати оптимальність. Крім того, класичний PID-підхід не враховує обмеження на керуючий сигнал, швидкість зміни керування або допустимі межі технологічних параметрів. Fuzzy-регулятор базується на використанні нечіткої логіки, що дозволяє формувати керуючі дії не лише на основі точних математичних моделей, а й на основі експертних правил. Такий підхід є особливо корисним у випадках, коли об’єкт керування складно описати точними диференціальними рівняннями або коли поведінка системи має нелінійний і невизначений характер. Робота нечіткого регулятора передбачає фазифікацію вхідних змінних, застосування бази правил типу «ЯКЩО–ТО» та дефазифікацію результату для формування конкретного керуючого сигналу. Вхідними змінними Fuzzy-регулятора найчастіше є похибка регулювання та швидкість її зміни. На основі цих параметрів система визначає доцільну інтенсивність керуючого впливу. Наприклад, якщо похибка є великою і швидко зростає, регулятор формує інтенсивну дію; якщо похибка мала і поступово зменшується, керуючий вплив може бути помірним. Завдяки цьому Fuzzy-регулятор здатний краще враховувати нелінійність процесу та логіку дій досвідченого оператора.

Перевагою нечіткого регулювання є гнучкість, адаптивність до складних об’єктів і можливість роботи за умов неповної інформації про математичну модель. Однак недоліком такого підходу є складність побудови бази правил, вибору функцій належності та налаштування параметрів нечіткого висновку. Якість роботи Fuzzy-регулятора значною мірою залежить від досвіду розробника та правильності формалізації експертних знань. MPC-регулятор, або регулятор з прогнозуючою моделлю, є одним із найбільш сучасних підходів до керування складними технологічними процесами. Його робота базується на використанні математичної моделі об’єкта, за допомогою якої прогнозується поведінка системи на певному часовому горизонті. На кожному кроці регулятор розв’язує оптимізаційну задачу, визначаючи такий керуючий вплив, який мінімізує заданий критерій якості з урахуванням обмежень системи. У загальному вигляді задача MPC може бути подана як мінімізація функціонала:

$$J = \sum_{k=1}^{N} \left(y_{ref}(k) - y(k)\right)^2 + \lambda \sum_{k=0}^{N-1} \Delta u(k)^2$$

де J – критерій якості керування; $y_{ref}(k)$ – задане значення вихідної координати; y(k) – прогнозоване значення вихідної координати; Δu(k) – зміна керуючого сигналу; N – горизонт прогнозування; λ – ваговий коефіцієнт, що визначає вплив зміни керування на загальний критерій.

Основною перевагою MPC є можливість врахування обмежень на керуючі сигнали, технологічні параметри та стан об'єкта. Це робить такий підхід ефективним для багатовимірних систем, хімічних і теплових процесів, енергетичних об'єктів, робототехнічних систем, електроприводів та складних виробничих ліній. MPC-регулятори забезпечують високу точність, можливість прогнозування майбутніх станів і оптимальне керування в умовах обмежень. Водночас їх недоліком є висока обчислювальна складність, потреба у достатньо точній математичній моделі та складність практичного впровадження на малоресурсних контролерах.

Табл.1.

Порівняльний аналіз PID-, Fuzzy- та MPC-регуляторів

Критерій порівняння	**PID-регулятор**	**Fuzzy-регулятор**	**MPC-регулятор**
Принцип роботи	Формує керуючий сигнал на основі пропорційної, інтегральної та диференціальної складових похибки регулювання.	Формує керуючий сигнал на основі нечіткої логіки, функцій належності та бази правил типу «ЯКЩО–ТО».	Формує керуючий сигнал на основі математичної моделі об'єкта та прогнозування майбутніх станів системи.
Необхідність математичної моделі	Не потребує точної математичної моделі, достатньо наближеного опису або експериментального налаштування.	Не потребує точної математичної моделі, оскільки може використовувати експертні знання про поведінку системи.	Потребує точної або достатньо адекватної математичної моделі об'єкта керування.
Робота з нелінійними системами	Має обмежену ефективність у системах із вираженими нелінійностями.	Добре працює з нелінійними, невизначеними та слабоформалізованими об'єктами.	Може ефективно працювати з нелінійними системами за умови наявності відповідної моделі.
Врахування обмежень системи	У класичному вигляді не враховує обмеження на керуючий сигнал або змінні стану.	Може частково враховувати обмеження через базу правил, однак непрямим способом.	Дозволяє безпосередньо враховувати обмеження на керуючі сигнали, змінні стану та технологічні параметри.
Складність налаштування	Відносно проста; можливе налаштування методами Зіглера–Ніколса, експериментально або за моделлю об'єкта.	Складніша, оскільки потребує вибору функцій належності, формування бази правил і налаштування нечіткого висновку.	Висока, оскільки необхідна ідентифікація моделі, вибір горизонту прогнозування, критерію оптимізації та вагових коефіцієнтів.
Обчислювальна складність	Низька.	Середня.	Висока.
Швидкодія	Висока для простих і добре налаштованих систем.	Достатньо висока, однак залежить від складності бази правил.	Може бути нижчою через необхідність розв'язання оптимізаційної задачі на кожному кроці керування.
Точність керування	Добра для лінійних або слабконелінійних об'єктів зі стабільними параметрами.	Вища, ніж у PID-регулятора, для нелінійних і невизначених систем.	Найвища для складних багатовимірних систем за умови правильної моделі.
Стійкість до зміни параметрів об'єкта	Низька або середня; при зміні параметрів може знадобитися повторне налаштування.	Середня або висока завдяки гнучкості нечітких правил.	Висока за умови адаптації або регулярного уточнення моделі.
Сфера застосування	Прості та типові промислові процеси: регулювання температури, тиску, рівня, витрати, швидкості.	Нелінійні, слабоформалізовані процеси, системи з невизначеністю, об'єкти без точної математичної моделі.	Складні багатовимірні системи з обмеженнями: хімічні процеси, енергетика, робототехніка, виробничі лінії.
Переваги	Простота, надійність, доступність реалізації, широке промислове застосування.	Гнучкість, адаптивність, можливість роботи без точної моделі, наближеність до логіки оператора.	Висока точність, оптимальність, прогнозування майбутніх станів, урахування обмежень.
Недоліки	Погано працює зі складними нелінійними та змінними системами, не враховує обмеження.	Складність проєктування, залежність від якості експертних правил і функцій належності.	Висока обчислювальна складність, потреба в точній моделі та значних обчислювальних ресурсах.
Доцільність використання	Доцільний для простих, стабільних і добре вивчених об'єктів керування.	Доцільний для нелінійних процесів, де складно отримати точну модель, але є експертне розуміння системи.	Доцільний для складних систем, де необхідна висока точність, прогнозування та врахування технологічних обмежень.

Для узагальнення результатів порівняння доцільно розглядати такі критерії: простота реалізації, вимоги до математичної моделі, здатність працювати з нелінійними об'єктами, можливість урахування

обмежень, обчислювальна складність, якість перехідного процесу та сфера практичного застосування. PID-регулятори є найбільш простими та доступними, однак мають обмежені можливості в складних нелінійних системах. Fuzzy-регулятори краще підходять для об'єктів із невизначеними параметрами та нелінійною поведінкою, але потребують якісної експертної бази правил. MPC-регулятори забезпечують найвищий рівень оптимальності й здатні враховувати обмеження, проте потребують значних обчислювальних ресурсів і наявності математичної моделі об'єкта.

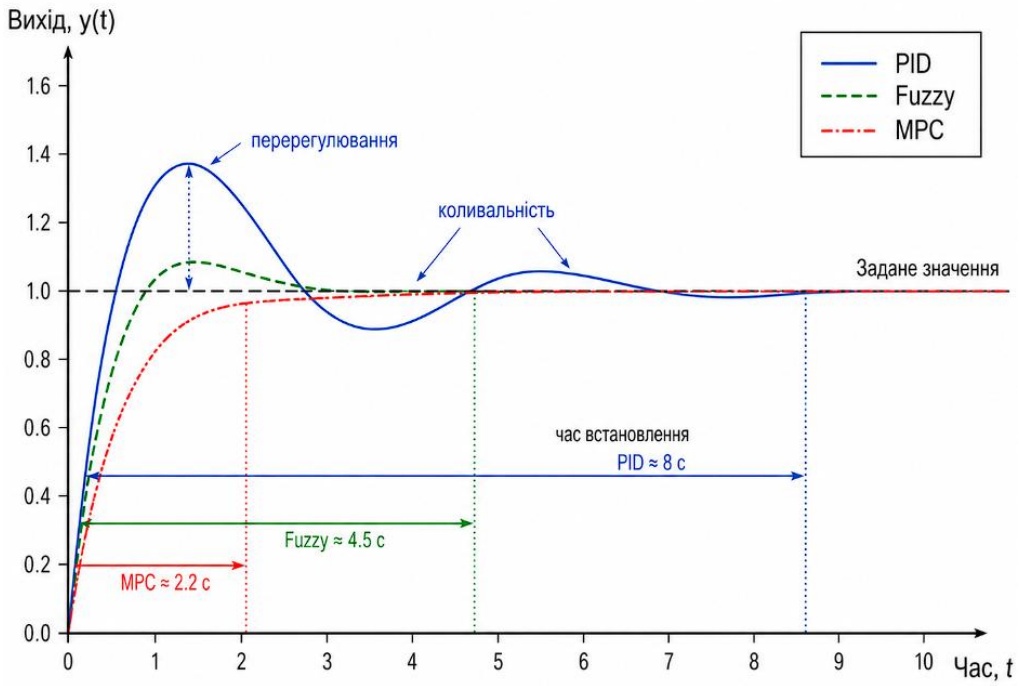

Рис.1. Порівняння перехідних характеристик PID-, Fuzzy- та MPC-регуляторів

Очікувані результати порівняльного аналізу свідчать, що PID-регулятори доцільно застосовувати у відносно простих технологічних процесах, де об'єкт керування має стабільні параметри, а вимоги до адаптивності не є критичними. Fuzzy-регулятори є ефективними для нелінійних або слабоформалізованих процесів, де важливо врахувати експертну логіку прийняття рішень. MPC-регулятори є найбільш перспективними для складних багатовимірних систем, у яких необхідно одночасно забезпечити високу точність, оптимізацію керування та дотримання технологічних обмежень.

Вибір типу регулятора повинен здійснюватися з урахуванням складності об'єкта керування, наявності математичної моделі, вимог до точності, швидкодії, стійкості та доступних обчислювальних ресурсів. У промислових системах автоматизації найбільш універсальним залишається PID-регулювання, однак для складних нелінійних процесів доцільним є використання Fuzzy-підходів, а для багатовимірних об'єктів з обмеженнями – MPC-регуляторів. Перспективним напрямом подальшого розвитку є поєднання зазначених методів у гібридних системах керування, наприклад Fuzzy-PID, адаптивних PID-регуляторах або MPC-системах з інтелектуальними алгоритмами налаштування.

Список використаних джерел:

1. Qin S.J., Badgwell T.A. A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology. *Control Engineering Practice*. 2003. Vol. 11, No. 7. P. 733–764. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967066102001867

2. Aboelhassan A., Abdelgeliel M., Zakzouk E.E., Galea M. Design and Implementation of Model Predictive Control Based PID Controller for Industrial Applications. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 24. Article 6594. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/13/24/6594

3. Nazha H.M., et al. A Comparative Study on Fuzzy Logic-Based Liquid Level Control Using MATLAB/Simulink and Real-Time Interface. *Computers*. 2025. Vol. 13, No. 3. Article 60. URL: https://www.mdpi.com/2079-3197/13/3/60

4. Mohindru P., et al. Review on PID, Fuzzy and Hybrid Fuzzy PID Controllers for Process Control Applications. *Artificial Intelligence Review*. 2024. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-024-10743-0

УДК 681.5:621.313:004.8

Власюк М.М., здобувач
Кравчук А.Р., доцент
Державний університет «Житомирська політехніка»

СИСТЕМА ПРЕДИКТИВНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙ

Сучасне промислове виробництво характеризується високим рівнем автоматизації, значною інтенсивністю технологічних процесів та постійною потребою в забезпеченні безперервної роботи електромеханічного обладнання. Електродвигуни, редуктори, насоси, вентилятори, компресори та підшипникові вузли є важливими елементами виробничих ліній, від справності яких залежить стабільність роботи всього підприємства. Несподівані відмови такого обладнання можуть призводити до аварійних зупинок, простоїв технологічних процесів, зниження якості продукції та значних фінансових втрат.

Традиційні підходи до технічного обслуговування, що базуються на планово-попереджувальних ремонтах, не завжди є достатньо ефективними. У багатьох випадках ремонт виконується або надто рано, коли обладнання ще має достатній ресурс роботи, або надто пізно, коли вже сформувалися критичні дефекти. Тому актуальним напрямом розвитку сучасної промислової автоматизації є впровадження систем предиктивного технічного обслуговування, які дають змогу оцінювати фактичний стан обладнання та прогнозувати можливі несправності до моменту їх критичного прояву.

Одним із найбільш інформативних методів контролю технічного стану електромеханічних систем є аналіз вібраційних сигналів. Вібрація відображає динамічний стан машини та містить інформацію про наявність механічних дефектів, зокрема дисбалансу ротора, розцентрування валів, пошкодження підшипників, ослаблення кріплень, зношування зубчастих передач і порушення режимів роботи. Саме тому вібраційна діагностика широко застосовується для моніторингу обертового обладнання в промислових системах.

Метою роботи є аналіз сучасних методів предиктивного технічного обслуговування електромеханічного обладнання на основі обробки вібраційних сигналів, а також обґрунтування структури інтелектуальної системи моніторингу технічного стану машин із використанням цифрової обробки сигналів та алгоритмів машинного навчання.

У запропонованій системі моніторингу основним джерелом діагностичної інформації є вібраційні датчики або акселерометри, встановлені на корпусах електродвигунів, редукторів, насосів чи підшипникових вузлів. Отримані сигнали надходять до модуля збору даних, де здійснюється їх попередня обробка, фільтрація шумів, нормалізація та перетворення у зручний для аналізу цифровий формат. Подальша обробка виконується у часовій і частотній областях.

У часовій області можуть визначатися такі параметри, як середньоквадратичне значення вібрації, пікове значення, коефіцієнт форми, коефіцієнт імпульсності та коефіцієнт ексцесу. Ці показники дозволяють оцінити загальний рівень вібраційної активності машини та виявити різкі зміни у її роботі. У частотній області застосовується швидке перетворення Фур'є, яке дає змогу перейти від часової форми сигналу до його спектрального представлення. Завдяки цьому можна визначити характерні частоти, пов'язані з обертанням вала, дефектами підшипників, дисбалансом або пошкодженнями зубчастих передач.

Загальний вигляд дискретного перетворення Фур'є можна подати у вигляді:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$

де X(k) – спектральна складова сигналу; x(n) – дискретні значення вібраційного сигналу; N – кількість відліків; k – номер частотної складової.

Алгоритм роботи системи передбачає послідовне виконання кількох етапів: зчитування вібраційного сигналу з датчика, попередню фільтрацію, виділення діагностичних ознак, спектральний аналіз, порівняння з допустимими значеннями, класифікацію технічного стану обладнання та формування рекомендацій щодо подальшого обслуговування. У разі виявлення аномальних змін система може автоматично повідомляти оператора про підвищений ризик відмови або необхідність проведення технічного огляду.

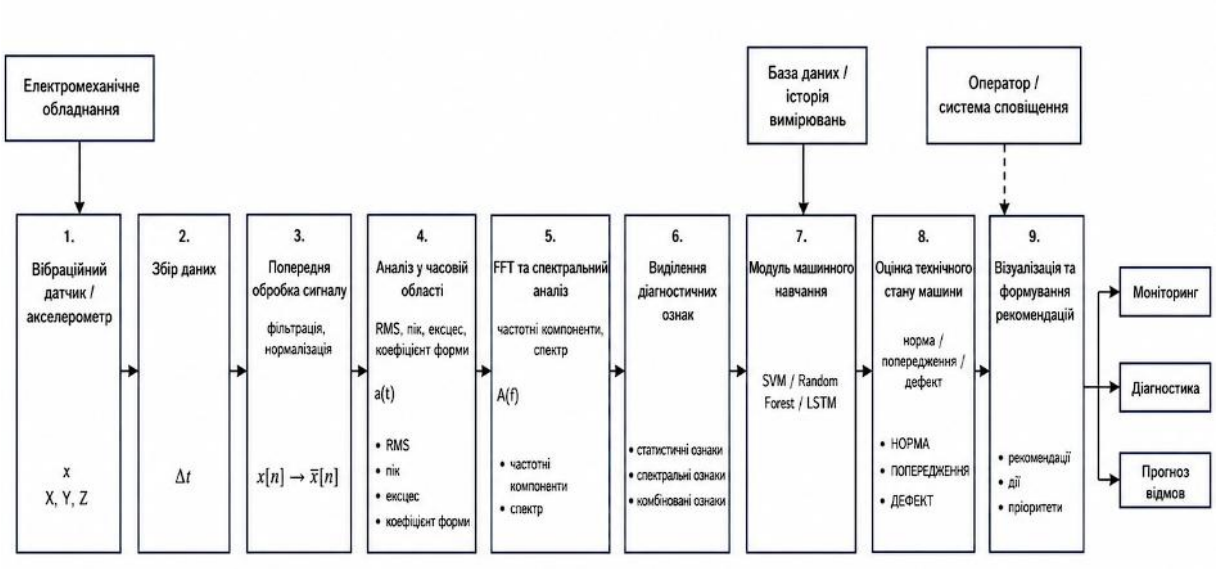

Рис. 1. Алгоритм обробки та візуалізації сигналів для оцінки стану машини

У межах концепції Industry 4.0 такі системи можуть інтегруватися з IoT-платформами, промисловими контролерами, SCADA-системами, хмарними сервісами та базами даних технічного стану обладнання. Це забезпечує можливість безперервного моніторингу в режимі реального часу, накопичення історичних даних і побудови прогнозних моделей. Для підвищення точності діагностики можуть застосовуватися алгоритми машинного навчання, зокрема Support Vector Machine, Random Forest, нейронні мережі та LSTM-моделі, які здатні аналізувати зміну параметрів у часі та прогнозувати розвиток дефектів.

Особливу перевагу мають інтелектуальні системи, які не лише фіксують перевищення допустимого рівня вібрації, а й виконують класифікацію типу несправності. Наприклад, система може відрізняти дисбаланс ротора від розцентрування валів або пошкодження підшипника за характерними спектральними ознаками. Це дозволяє не просто виявити факт погіршення стану обладнання, а й визначити ймовірну причину дефекту та сформувати більш точні рекомендації для ремонтного персоналу. Очікуваним результатом впровадження системи предиктивного технічного обслуговування є зменшення кількості аварійних зупинок, підвищення надійності електромеханічного обладнання, скорочення витрат на ремонт і зменшення впливу людського фактора під час діагностики. Крім того, використання такого підходу дає змогу перейти від планового ремонту до обслуговування за фактичним технічним станом, що є більш економічно обґрунтованим і технічно ефективним.

Список використаних джерел:

1. Lei Y. Intelligent Fault Diagnosis and Remaining Useful Life Prediction of Rotating Machinery. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. 376 p. URL: https://www.sciencedirect.com/book/9780128115343/intelligent-fault-diagnosis-and-remaining-useful-life-prediction-of-rotating-machinery
2. Randall R.B. Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications. Chichester: Wiley, 2011. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470977668
3. Carvalho T.P. et al. A Systematic Literature Review of Machine Learning Methods Applied to Predictive Maintenance. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 137. Article 106024. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835219304838
4. Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D. A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-Based Maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 1483–1510. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327005001512

УДК 621.316.1

Манзевитий В., здобувач
Гуменюк А.А., доцент
Державний університет «Житомирська політехніка»

СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ В ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Ефективне функціонування сучасних трифазних електричних мереж значною мірою залежить від якості електроенергії та стабільності основних електричних параметрів. Одним із поширених і небезпечних порушень режиму роботи мережі є несиметрія напруги, яка виникає внаслідок нерівномірного розподілу однофазних навантажень між фазами, пошкодження елементів мережі, порушення контактних з'єднань або виникнення аварійних режимів. Тривала робота електрообладнання в умовах несиметрії напруги призводить до появи додаткових втрат електроенергії, перегріву обмоток електричних машин, зниження ККД, підвищення рівня вібрацій та скорочення терміну експлуатації ізоляції.

Особливо чутливими до несиметрії напруги є асинхронні електродвигуни, які широко використовуються в промислових системах електропривода. Навіть незначне відхилення фазних напруг може спричиняти появу струмів зворотної послідовності, що створюють гальмівний електромагнітний момент і викликають додаткове теплове навантаження на двигун. У результаті погіршується енергоефективність роботи обладнання, зростає ризик аварійних зупинок і збільшуються витрати на технічне обслуговування. Традиційні підходи до виявлення несиметрії напруги часто ґрунтуються на періодичних вимірюваннях або використанні електромеханічних реле контролю фаз. Такі засоби мають низку недоліків, серед яких обмежена точність, значна затримка спрацювання, недостатня інформативність та складність реалізації безперервного моніторингу в реальному часі. Крім того, у динамічних режимах навантаження виникає потреба не лише у фіксації факту відхилення фазних напруг, а й у точному розрахунку складових прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Метою роботи є розробка мікропроцесорної системи виявлення несиметрії напруги в трифазних електричних мережах, яка забезпечує автоматизований контроль показників якості електроенергії, обробку вимірювальної інформації в режимі реального часу та оперативне виявлення небезпечних режимів роботи мережі. Запропонована система базується на використанні вимірювальних перетворювачів фазних напруг, багатоканального аналого-цифрового перетворювача та мікроконтролера, який виконує основні операції цифрової обробки сигналів. Вимірювальні перетворювачі забезпечують приведення напруги мережі до безпечного рівня, придатного для подальшого оцифрування. Після цього сигнали фазних напруг надходять до аналого-цифрового перетворювача, де здійснюється їх дискретизація та передавання до програмного модуля обробки.

Алгоритмічне забезпечення системи реалізує метод симетричних складових, який дозволяє подати несиметричну трифазну систему напруг у вигляді сукупності трьох симетричних систем: прямої, зворотної та нульової послідовностей. Пряма послідовність характеризує нормальний режим роботи мережі, зворотна послідовність відображає рівень несиметрії, а нульова послідовність пов'язана з наявністю однакових за фазою складових у всіх трьох фазах. Для підвищення точності вимірювання в системі застосовується цифрова фільтрація сигналів, що дозволяє зменшити вплив шумів, імпульсних перешкод і гармонічних спотворень. Додатково може виконуватися аналіз гармонічного складу напруги, оскільки наявність вищих гармонік впливає на достовірність визначення показників якості електроенергії. Такий підхід дозволяє підвищити надійність виявлення несиметричних режимів навіть за умов змінного навантаження та нестабільних параметрів мережі.

Математична модель визначення коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю має вигляд:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%$$

де K_{2U} – коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю; U_1 – діюче значення напруги прямої послідовності; U_2 – діюче значення напруги зворотної послідовності.

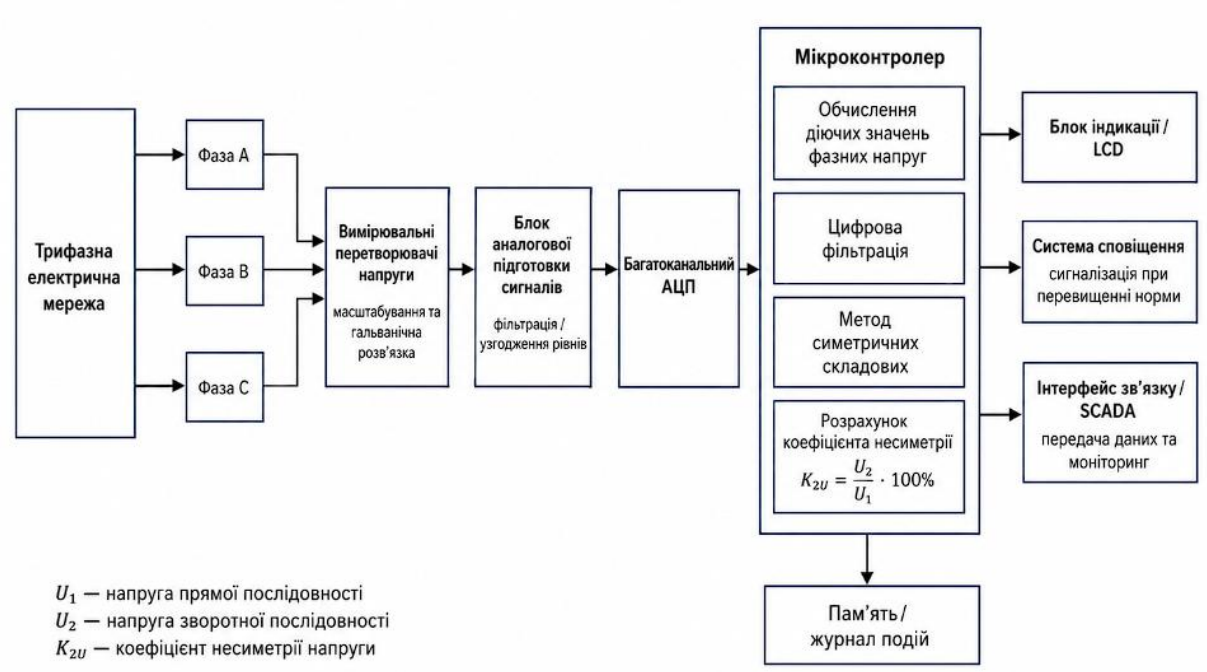

Рис. 1. Структурна схема мікропроцесорної системи виявлення несиметрії напруги в трифазній електричній мережі

Структурно система складається з блока вимірювання фазних напруг, блока аналогової підготовки сигналів, аналого-цифрового перетворювача, мікроконтролера, програмного модуля обчислення симетричних складових, модуля оцінювання коефіцієнта несиметрії, блока індикації та системи сповіщення. У разі перевищення допустимого значення коефіцієнта несиметрії система може формувати попереджувальний сигнал для оператора або передавати інформацію до SCADA-системи для подальшого аналізу й прийняття керуючих рішень.

Застосування запропонованого підходу дозволяє автоматизувати процес контролю якості електроенергії та забезпечити швидке виявлення небезпечних режимів роботи трифазної мережі. На відміну від традиційних електромеханічних реле, мікропроцесорна система дає змогу не лише фіксувати факт несиметрії, а й кількісно оцінювати її рівень, аналізувати динаміку зміни параметрів і зберігати результати вимірювань для подальшої діагностики.

Очікуваним результатом впровадження такої системи є підвищення надійності електропостачання, зниження ймовірності аварійних зупинок промислового обладнання, зменшення додаткових втрат електроенергії та продовження терміну експлуатації електричних машин. Крім того, автоматизований моніторинг несиметрії напруги дозволяє зменшити вплив людського фактора та створити основу для побудови систем автоматичної компенсації несиметричних режимів.

Список використаних джерел:

1. Laadjal K., Sahraoui M., Alloui A., Cardoso A.J.M. Three-Phase Induction Motors Online Protection against Unbalanced Supply Voltages. *Machines*. 2021. Vol. 9, No. 9. Article 203. URL: https://www.mdpi.com/2075-1702/9/9/203

2. Laadjal K., Amaral A.M.R., Sahraoui M., Cardoso A.J.M. Machine Learning Based Method for Impedance Estimation and Unbalance Supply Voltage Detection in Induction Motors. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 18. Article 7989. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/18/7989

3. Bina M.T., Kashefi A. Three-phase unbalance of distribution systems: Complementary analysis and experimental case study. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2011. Vol. 33, No. 4. P. 817–826. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014206151000205X

4. Adekitan A.I. A New Definition of Voltage Unbalance Using Supply Phase Shift. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 2020. Vol. 31. P. 718–725. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s40313-020-00579-8

УДК 681.5:621.577

Кунікін І.М., здобувач
Державний університет «Житомирська політехніка»

РОЗРОБКА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕКУПЕРАЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ НА БАЗІ МАЙНІНГ-ОБЛАДНАННЯ

Стрімкий розвиток обчислювальних технологій та цифровізація економіки зумовлюють зростання кількості енергоємного обладнання. Ефективне управління тепловими потоками таких систем є критичним завданням енергозбереження. Створення автоматизованих систем керування дозволяє інтегрувати IT-інфраструктуру в побутові та промислові системи опалення, що є актуальним кроком до підвищення загальної енергоефективності. Впровадження систем імерсійного охолодження з функцією рекуперації є перспективним напрямом для підвищення енергоефективності та екологічності обчислювальних процесів.

Традиційне використання майнинг-обладнання супроводжується значними втратами енергії, оскільки тепло від обчислювальних процесів просто розсіюється. Повітряні системи охолодження залежні від чистоти середовища та створюють акустичний дискомфорт, що обмежує їх експлуатацію в житлових зонах. Крім того, гаряче повітря має низьку теплоємність, що робить його транспортування та ефективне використання для опалення приміщень практично неможливим. Існуючі методи ручного контролю не забезпечують необхідної надійності при переході на рідинне охолодження

Метою дослідження є створення надійної та енергоефективної АСК рекуперацією вторинного тепла, яка використовує технологію імерсійного охолодження для перетворення обчислювальної машини на автономне джерело опалення.

Розроблена двоконтурна установка базується на технології імерсійного охолодження, де обчислювальний блок занурений у спеціальну діелектричну рідину – рис. 1. Система автоматизації реалізує передачу теплової енергії від внутрішнього контуру до зовнішнього (системи опалення) через пластинчастий теплообмінник.

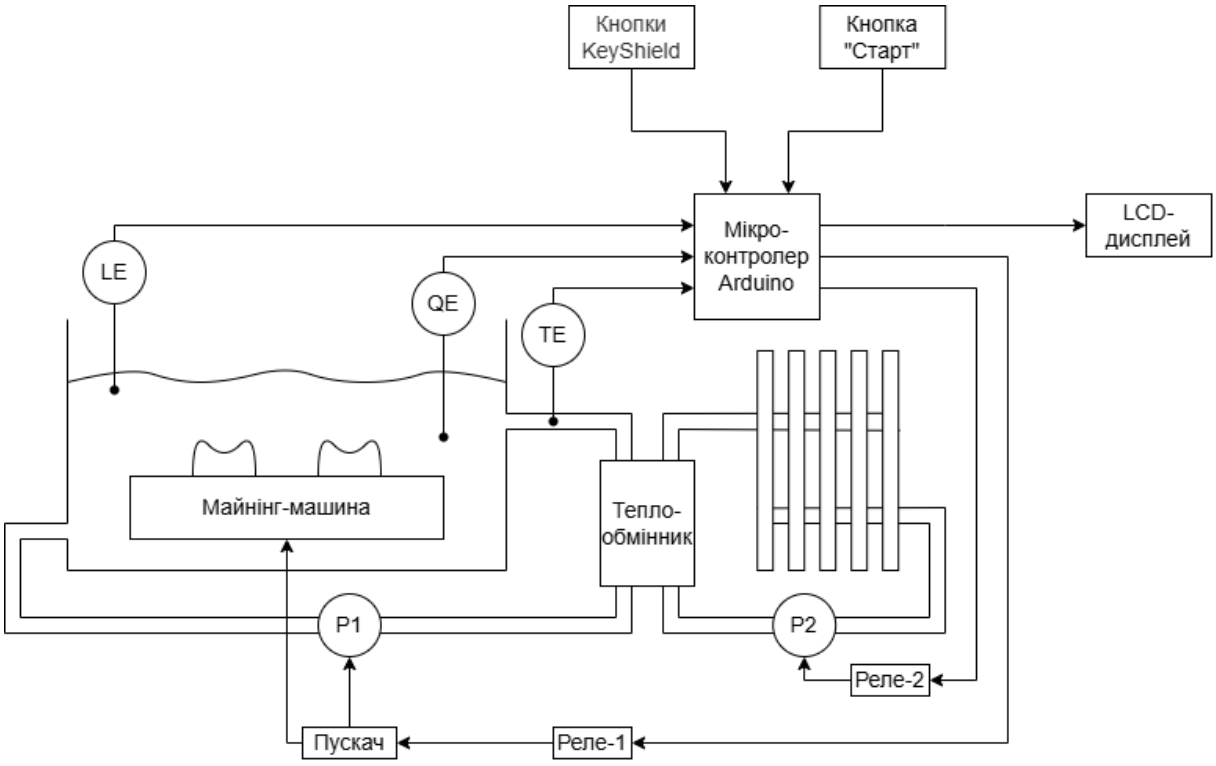

Рис.1. АСК двоконтурною рекуперацією установкою

В основі алгоритму керування лежить релейний закон з гістерезисом, який реалізовано програмно для підтримки теплового балансу в межах ±2…3°C. Такий вибір зумовлений високою інерційністю об’єкта та необхідністю захисту виконавчих механізмів від надто частого перемикання. Мікроконтролер постійно порівнює дані з термодатчика із заданими значеннями в енергонезалежній пам’яті, активуючи відбір тепла у другий контур лише при досягненні встановленого порогу.

Особливу увагу приділено дискретній логіці безпеки, яка працює паралельно з температурним регулятором. Система автоматично знеструмлює обладнання у разі падіння рівня рідини, підвищення її провідності (що свідчить про забруднення або наявність вологи) або при перевищенні критичної позначки.

Інтерфейс користувача дозволяє в реальному часі змінювати цільову температуру та відстежувати роботу установки. Це дозволяє перетворити майнінг-машину на інтелектуальний електричний котел з автоматичним підтриманням заданих параметрів.

Розроблена АСК забезпечує повну автоматизацію процесу рекуперації, усуває проблему високого шуму та захищає обладнання від перегріву й витоків теплоносія. Впровадження системи дозволяє використовувати майнінг-машину як безшумний електричний котел, що знижує витрати на опалення (в залежності від обраної моделі маайнінг-обладнання – заробляє на опаленні) та подовжує термін служби чіпів за рахунок стабільного температурного режиму, перетворюючи обчислювальний процес на стабільне джерело тепла, з екологічним підходом до вторинного використання енергії.. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію системи в мережі «розумного будинку» для дистанційного моніторингу

Список використаних джерел:

1. Cheng C.C., Chang P.C., Li H.C., Hsu F.I. Design of a Single-Phase Immersion Cooling System through Experimental and Numerical Analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 160. Article 120203. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931020331392
2. Zhou X., Xin Z., Tang W., Sheng K., Wu Z. Comparative Study for Waste Heat Recovery in Immersion Cooling Data Centers with District Heating and Organic Rankine Cycle (ORC). *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 242. Article 122479. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431124001479
3. Zhang L. et al. Zero-Carbon Development in Data Centers Using Waste Heat Recovery Technologies: A Review. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 22. Article 10101. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/17/22/10101
4. Corigliano O. et al. Turning Data Center Waste Heat into Energy: A Guide to Organic Rankine Cycle Solutions. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 14. Article 6046. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/14/14/6046
5. Huang X. et al. Cooling Technologies for Internet Data Center in China: Classification, Energy Saving and Carbon Reduction. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 20. Article 7158. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/20/7158
6. Chang Q. et al. Optimization Control Strategies and Evaluation Metrics of Data Center Cooling Systems: A Bibliometric Analysis. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 16. Article 7222. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/16/16/7222
7. Zhou K. et al. Immersion Cooling Technology Development Status of Data Centers. *Science and Technology for Energy Transition*. 2024. Vol. 79. Article 13. URL: https://www.stet-review.org/articles/stet/full_html/2024/01/stet20240005/stet20240005.html
8. Zhou C. et al. Energy Performance Study of a Data Center Combined with Renewable Energy Sources and Waste Heat Recovery. *Buildings*. 2025. Vol. 15, No. 3. Article 326. URL: https://www.mdpi.com/2075-5309/15/3/326

УДК 681.5:004.932

Марченко К.Л., здобувач
Ткачук Д.Ю., аспірантка
Державний університет «Житомирська політехніка»

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Використання автоматизації у виробничих процесах є невід'ємною частиною сучасної промисловості. Велику роль в даних процесах відіграють системи контролю якості продукції, вони дозволяють мінімізувати кількість дефектів, збільшити ефективність виробництва та зменшити вплив людського фактору. Технології комп'ютерного зору забезпечують автоматичний аналіз зображень в реальному часі, що є найбільш перспективним рішенням в даній сфері.

Технології комп'ютерного зору в системах контролю якості продукції формується на основі використання промислових камер, засобів освітлення та алгоритмів обробки зображень. Камери виступають базовими сенсорами, що забезпечують безперервний збір візуальних даних про об'єкти, тоді як алгоритми обробки зображень відповідають за аналіз даних та визначення наявності дефектів. Автоматизовані системи, на відміну від традиційного контролю оператора, здатні працювати безперервно, забезпечують мінімізацію людського фактору, стабільність результату та високу швидкість перевірки.

Системи контролю якості на основі комп'ютерного зору мають типову структуру та мають декілька основних модулів: відеокамери, системи освітлення, модуль попередньої обробки зображень, блок аналізу ознак та систем прийняття рішень. Попередня обробка передбачає фільтрацію шумів, корекцію яскравості та контрасту, а також нормалізацію зображення, з метою підвищення точності для подальшого аналізу. Після цього етапу алгоритми сегментації виокремлюють об'єкти або ділянки з дефектами, а класифікатор визначає придатність виробу за встановленими стандартами.

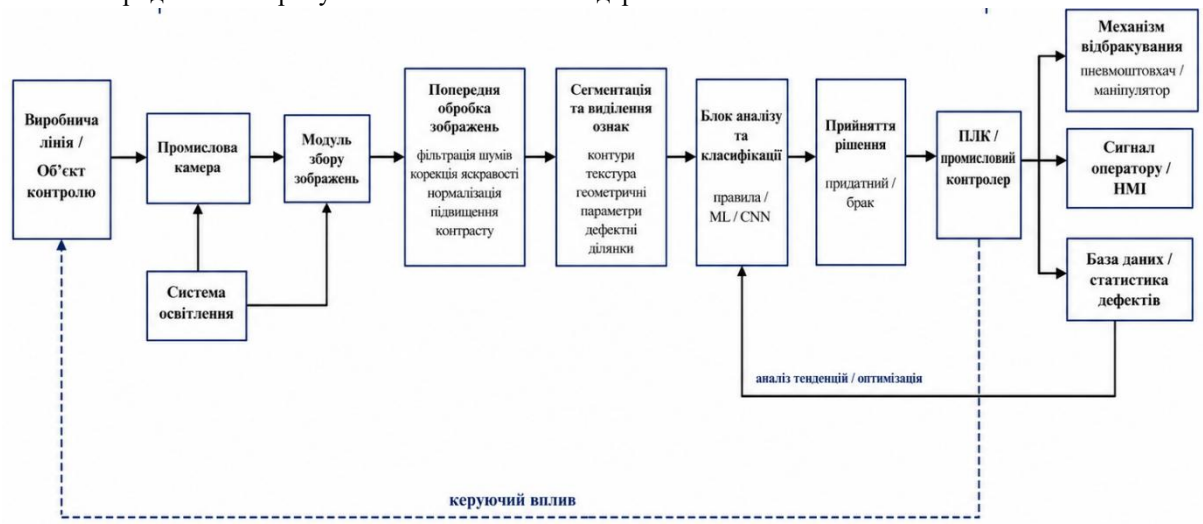

Рис. 1. Структурна схема автоматизованої системи контролю якості продукції на основі комп'ютерного зору

Сучасні системи комп'ютерного зору активно використовують нейронні мережі та методи машинного навчання. Навчання відбувається на еталонних зразках і після цього система може автоматично виявляти такі дефекти як: тріщини, подряпини, деформації, порушення геометрії, помилки маркування, нерівномірність покриття та інші. У разі виявлення браку продукції формується сигнал на промисловий контролер, він в свою чергу активує механізм відбракування продукції. Відбракування може реалізовуватися за допомогою пневматичних штовхачів, роботизованих маніпуляторів, скидання виробу потоком стисненого повітря або подачею сигналу оператору. Це дозволяє автоматизувати сортування виробів та зменшити ризик потрапляння дефектної продукції до споживача.

Однією з важливих переваг автоматизованих систем контролю є можливість збереження та накопичення статистичних даних про дефекти. Аналіз накопиченої інформації дає змогу визначати причини виникнення браку, контролювати високу стабільність технологічних процесів та своєчасне виконання профілактичних заходів обслуговування обладнання. Системи комп'ютерного зору виконують не лише функцію перевірки продукції, але й стають інструментом аналітики, що сприяє довгостроковій оптимізації виробництва.

Інтеграція технологій комп'ютерного зору у виробничі процеси забезпечує значне підвищення точності контролю продукції, зменшення витрат на переробку та повернення дефектованої продукції, а також підвищення загальної ефективності підприємства. Автоматизовані системи здатні здійснювати безперервний моніторинг продукції у режимі реального часу, що дозволяє оперативно виявляти дефекти та запобігати поширенню браку на наступні етапи виробництва. Використання алгоритмів машинного навчання дає можливість системам адаптуватися до змін умов виробництва, підвищувати точність розпізнавання дефектів та зменшувати кількість помилкових спрацювань. Крім того, накопичення та аналіз статистичних даних про виявлені дефекти дозволяє визначати причини виникнення відхилень, оптимізувати технологічні процеси та своєчасно виконувати технічне обслуговування обладнання. У результаті впровадження таких систем підприємства отримують стабільніший рівень якості продукції, скорочення виробничих витрат та підвищення конкурентоспроможності на ринку.

Список використаних джерел:

1. Gao Y., Li X., Wang X.V., Wang L., Gao L. A Review on Recent Advances in Vision-based Defect Recognition towards Industrial Intelligence. *Journal of Manufacturing Systems*. 2022. Vol. 62. P. 753–766. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612521001059
2. Lee C., Kim Y., Kim H. Computer-Vision-Based Product Quality Inspection and Novel Counting System. *Applied System Innovation*. 2024. Vol. 7, No. 6. Article 127. URL: https://www.mdpi.com/2571-5577/7/6/127
3. Hütten N. et al. Deep Learning for Automated Visual Inspection in Manufacturing and Maintenance: A Survey of Open-Access Papers. *Applied System Innovation*. 2024. Vol. 7, No. 1. Article 11. URL: https://www.mdpi.com/2571-5577/7/1/11
4. Ribeiro A.G. et al. Automatic Visual Inspection for Industrial Application. *Journal of Imaging*. 2025. Vol. 11, No. 10. Article 350. URL: https://www.mdpi.com/2313-433X/11/10/350
5. Bhavanasi G. et al. Enhanced Vision-Based Quality Inspection: A Multiview Deep Learning Approach for Manufacturing Defect Detection. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 6. Article 1703. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/25/6/1703
6. Okano M.T. et al. Edge AI for Industrial Visual Inspection: YOLOv8-Based Visual Conformity Detection Using Raspberry Pi. *Algorithms*. 2025. Vol. 18, No. 8. Article 510. URL: https://www.mdpi.com/1999-4893/18/8/510

УДК 681.5:004.8

Зіневич В.Ю., здобувач
Гуменюк А.А., доцент
Державний університет «Житомирська політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ АВАРІЙНИХ СТАНІВ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Надійна робота силового електрообладнання є важливою умовою стабільності енергетичних і промислових систем. Трансформатори, електродвигуни, комутаційні апарати та кабельні лінії працюють під дією значних навантажень, температурних змін і зовнішніх збурень, тому приховані дефекти можуть призводити до аварій, простоїв і фінансових втрат. Традиційне планово-попереджувальне обслуговування не завжди враховує фактичний стан обладнання, тому актуальним є впровадження інтелектуальних систем предиктивного моніторингу, які за допомогою штучного інтелекту аналізують дані в реальному часі, виявляють аномалії та прогнозують аварійні стани.Метою роботи є розробка та дослідження підходу до прогнозування аварійних станів електрообладнання на основі алгоритмів машинного навчання, що забезпечує раннє виявлення передаварійних режимів і підвищення надійності електроенергетичних об’єктів.

Запропонована система базується на архітектурі промислового Інтернету речей. Збір даних здійснюється за допомогою інтелектуальних датчиків струму, напруги, температури обмоток, вібрації та інших діагностичних параметрів. Отримані сигнали надходять до мікроконтролера, наприклад ESP32 або STM32, де виконується попередня обробка, фільтрація шумів і нормалізація даних. Передавання інформації до сервера або хмарної платформи може здійснюватися через бездротові канали зв’язку з використанням протоколу MQTT. На серверному рівні виконується накопичення історичних даних, аналіз поточних параметрів і порівняння їх з еталонними профілями справного стану обладнання. Інтелектуальний модуль доцільно реалізовувати на основі рекурентних нейронних мереж типу LSTM, які ефективно працюють із часовими рядами та дозволяють виявляти приховані закономірності у зміні параметрів електрообладнання. Навчання моделі може виконуватися засобами Python із використанням бібліотек TensorFlow або PyTorch.

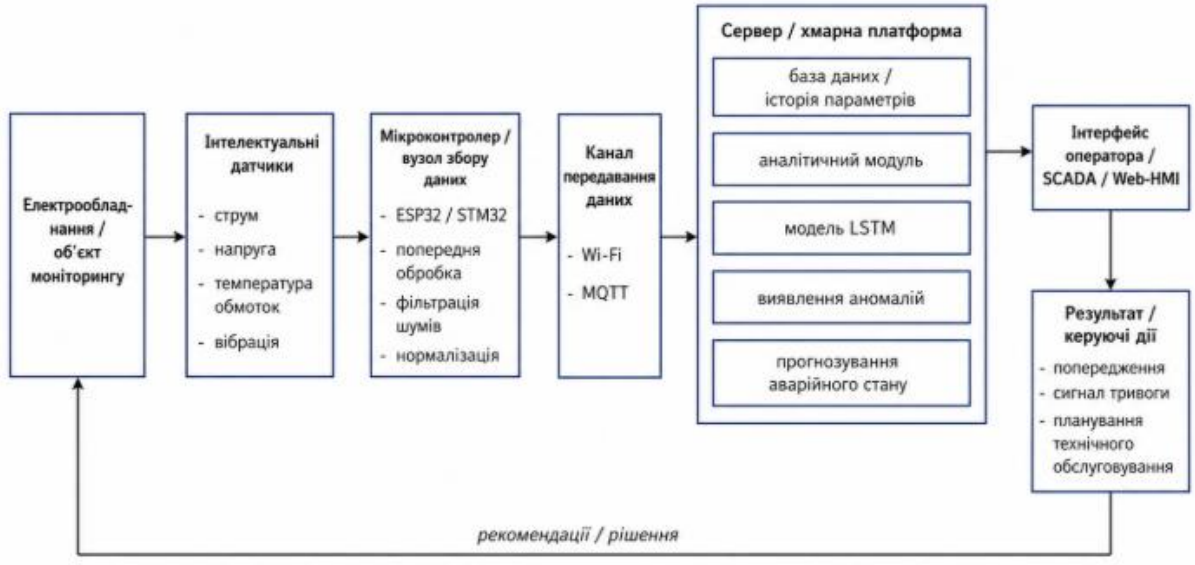

Рис.1. Структурна схема інтелектуальної системи прогнозування аварійних станів електрообладнання

Узагальнено робота системи включає такі етапи: вимірювання електричних і теплових параметрів, попередню обробку сигналів, передавання даних на сервер, аналіз часових рядів за допомогою LSTM-моделі, виявлення аномалій, прогнозування аварійного стану та формування повідомлення для оператора або системи керування.

Список використаних джерел:

1. Li Z., He Q., Li J. A Survey of Deep Learning-Driven Architecture for Predictive Maintenance. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 133, Part C. Article 108285. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197624004433

УДК 681.5:004.738.5

Вернидуб Б.Д., здобувач
Пуховський Є.С., професор
Державний університет «Житомирська політехніка»

ІНТЕГРАЦІЯ PLC-КОНТРОЛЕРА ТА ХМАРНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЧОГО ОБЛАДНАННЯ

Сучасні промислові підприємства поступово переходять до цифрових моделей виробництва, що передбачають інтеграцію фізичних технологічних об'єктів із інформаційними системами, хмарними сервісами та засобами аналітичної обробки даних. У таких умовах особливого значення набуває віддалений моніторинг промислового обладнання, який дозволяє контролювати стан виробничих процесів у режимі реального часу, своєчасно виявляти аварійні ситуації та накопичувати дані для подальшого аналізу. Традиційні SCADA-системи широко застосовуються для локального контролю технологічних процесів, однак вони здебільшого прив'язані до конкретного виробничого майданчика та мають обмежені можливості масштабування. Такі системи забезпечують візуалізацію параметрів, архівування даних і сигналізацію аварій, проте не завжди є достатньо ефективними для реалізації хмарної аналітики, предиктивного технічного обслуговування та централізованого моніторингу територіально розподілених об'єктів. У зв'язку з цим актуальним є використання гібридних Edge-Cloud IIoT-архітектур, які поєднують локальну обробку критичних даних із передаванням агрегованої інформації до хмарної платформи.

Метою роботи є розробка та обґрунтування архітектури системи віддаленого моніторингу промислового обладнання на основі інтеграції PLC-контролерів, промислового IoT-шлюзу та хмарної платформи для забезпечення оперативного контролю, зберігання даних і аналітичної обробки параметрів технологічного процесу.

На сьогодні існує декілька основних підходів до організації віддаленого моніторингу промислового обладнання. Перший підхід базується на використанні локальних SCADA-систем, таких як Siemens WinCC, Wonderware або Ignition. Вони характеризуються високою надійністю та зручністю для локального керування, однак мають обмеження щодо віддаленого доступу, масштабованості та інтеграції з сервісами машинного навчання. Другий підхід передбачає використання хмарних IIoT-платформ, зокрема Azure IoT Hub, AWS IoT або Google Cloud IoT, які забезпечують централізоване зберігання даних, доступність через мережу Інтернет і можливість аналітики великих масивів інформації. Третій підхід – це гібридна Edge-Cloud архітектура, у якій критична обробка даних виконується локально на Edge-рівні, а хмара використовується для довготривалого зберігання, візуалізації та прогнозної аналітики. Запропонована система складається з трьох функціональних рівнів. На нижньому рівні розміщуються PLC-контролери, які здійснюють збір аналогових і дискретних сигналів з датчиків температури, вібрації, струму, тиску та інших параметрів обладнання. Період опитування датчиків може становити 100–500 мс залежно від динаміки технологічного процесу та вимог до швидкодії системи. Середній рівень представлений промисловим IoT-шлюзом, який виконує обмін даними з PLC-контролером за протоколами OPC-UA або Modbus TCP. На цьому рівні здійснюється попередня фільтрація, нормалізація, буферизація та підготовка даних до передавання у хмару. У разі тимчасової втрати інтернет-з'єднання шлюз забезпечує локальне збереження інформації з подальшою синхронізацією після відновлення зв'язку. Передавання телеметрії до хмарної платформи доцільно реалізовувати за допомогою протоколу MQTT із використанням захищеного каналу TLS. Верхній рівень системи реалізується на базі хмарної платформи, наприклад Azure IoT Hub. На цьому рівні здійснюється приймання та маршрутизація повідомлень, зберігання часових рядів у базах даних типу InfluxDB або TimescaleDB, аналітична обробка параметрів, виявлення аномалій, формування сповіщень і візуалізація даних через веб-інтерфейс або Grafana. За потреби система може інтегруватися з ERP- та MES-системами підприємства через REST API.

Важливим елементом розробки є вибір протоколів передавання даних. OPC-UA є сучасним промисловим стандартом, що підтримує структуроване представлення даних, захищений обмін і механізм підписок на зміну параметрів. Modbus TCP є простим і поширеним протоколом, який доцільно використовувати для інтеграції зі старішим обладнанням, однак він потребує додаткових засобів мережевого захисту. MQTT є легким протоколом обміну повідомленнями, оптимальним для передавання телеметрії від IoT-шлюзу до хмарної платформи завдяки низькому навантаженню на мережу та підтримці рівнів якості обслуговування.

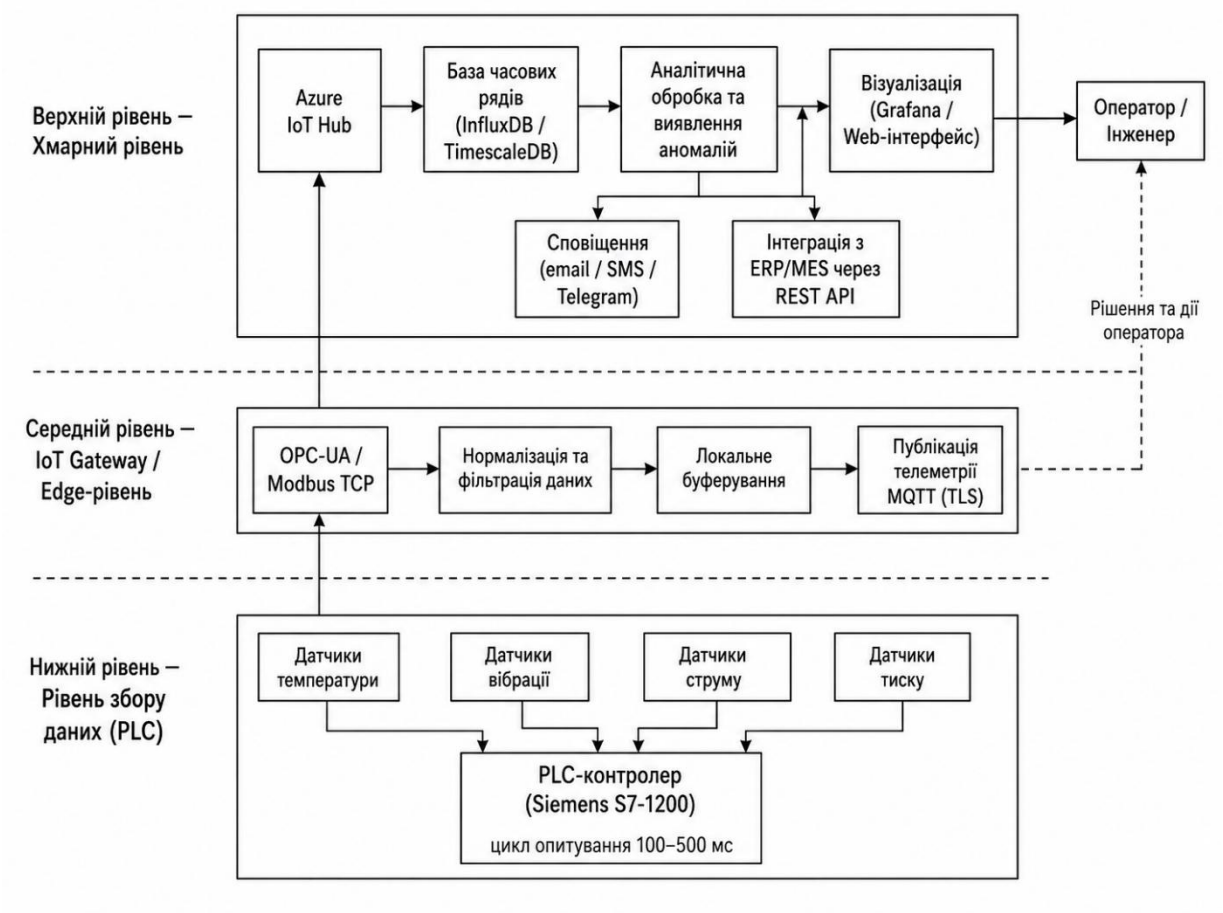

Рис.1. Архітектура гібридної Edge-Cloud IIoT-системи віддаленого моніторингу промислового обладнання

Використання запропонованої архітектури дозволяє забезпечити оперативний контроль параметрів обладнання, скоротити час реагування на аварійні ситуації, накопичувати ретроспективні дані для предиктивного обслуговування та надати доступ до показників системи з будь-якого пристрою через веб-браузер. Реалізація прототипу на базі PLC Siemens S7-1200 та Azure IoT Hub показує можливість практичного впровадження такої системи у виробничих умовах. Середня затримка передавання даних на рівні близько 420 мс є прийнятною для задач моніторингу та аналітики, тоді як критичні керуючі функції залишаються на локальному PLC- або Edge-рівні.

Список використаних джерел:

1. Rocha M.S., Sestito G.S., Dias A.L., Turcato A.C., Brandão D., Ferrari P. On the Performance of OPC UA and MQTT for Data Exchange between Industrial Plants and Cloud Servers. *Acta IMEKO*. 2019. Vol. 8, No. 2. P. 80–87. URL: https://acta.imeko.org/index.php/acta-imeko/article/view/IMEKO-ACTA-08%20%282019%29-02-11

2. Salhaoui M., Arioua M., Guerrero-González A., Arioua M., Ortiz F.J. Smart Industrial IoT Monitoring and Control System Based on UAV and Cloud Computing Applied to a Concrete Plant. *Sensors*. 2019. Vol. 19, No. 15. Article 3316. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/19/15/3316

3. Gaiduchek D., Kryvoplias-Volodina L., Kostin V., Burova Z., Zaporozhets O. Synthesis of an Analytical System Prototype Using MQTT and AWS in the Industry 4.0 Context. *CEUR Workshop Proceedings*. 2025. Vol. 4146. P. 487–497. URL: https://ceur-ws.org/Vol-4146/paper29.pdf

4. Siemens AG. Data Transfer to Microsoft Azure with an S7-1500. Siemens Industry Online Support. 2022. URL: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109772284/109772284_Datatransfer_Azure_S7-1500_DOKU_en.pdf

УДК 681.5:004.4

Вернидуб Б.Д., здобувач
Пуховський Є.С., професор
Державний університет «Житомирська політехніка»

РОЗРОБКА SCADA-СИСТЕМИ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ МАЛОГО ПІДПРИЄМСТВА

Сучасний промисловий сектор характеризується активним впровадженням цифрових технологій, автоматизованих систем керування та засобів дистанційного моніторингу технологічних процесів. Одним із ключових інструментів промислової автоматизації є SCADA-системи, які забезпечують збір, обробку, архівування та візуалізацію технологічних даних у режимі реального часу. Використання таких систем дозволяє підвищити надійність роботи обладнання, зменшити вплив людського фактора, прискорити реагування на аварійні ситуації та забезпечити зручний контроль параметрів виробництва. Традиційні підходи до побудови SCADA-систем часто базуються на використанні комерційного програмного забезпечення, що може потребувати значних фінансових витрат на ліцензування, технічну підтримку та масштабування. Для малих і середніх підприємств доцільним є застосування гнучких рішень на основі відкритих програмних інструментів, які дозволяють реалізувати функції диспетчеризації, збору даних, аварійної сигналізації та веб-візуалізації з мінімальними витратами.

Метою роботи є розробка SCADA-системи моніторингу та керування технологічним процесом на основі програмованого логічного контролера Siemens S7-1200, промислової мережі Ethernet, протоколу Modbus TCP, платформи Node-RED, бази даних PostgreSQL та засобів візуалізації Grafana.

Розроблювана система побудована за класичною трирівневою архітектурою SCADA: рівень польових пристроїв, рівень керування та рівень диспетчеризації. Така структура забезпечує чіткий розподіл функцій між окремими компонентами системи, підвищує її надійність і створює можливість подальшого масштабування. Перший рівень становлять польові пристрої, до яких належать датчики технологічних параметрів: термоперетворювачі, датчики тиску, витратоміри, а також дискретні сигнали стану обладнання. Вони забезпечують первинне вимірювання параметрів технологічного процесу та передавання сигналів до програмованого логічного контролера. Другий рівень реалізовано на базі PLC Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC. Даний контролер виконує програму керування, здійснює циклічне опитування аналогових і дискретних входів, масштабує сигнали до фізичних одиниць, контролює технологічні параметри, формує аварійні сигнали та реалізує прості алгоритми регулювання, зокрема ПІД-регулювання. Для передавання даних на SCADA-сервер використовується протокол Modbus TCP через промислову мережу Ethernet. Третій рівень представлений SCADA-сервером, реалізованим на базі промислового міні-комп'ютера Raspberry Pi 4. Серверна частина системи побудована з використанням платформи Node-RED, яка забезпечує створення потоків обробки даних, підтримку промислових протоколів і швидке розгортання веб-інтерфейсу. Для архівування виміряних значень, аварійних повідомлень, уставок і даних про обладнання застосовується база даних PostgreSQL. Візуалізація трендів і аналітичних панелей реалізується за допомогою Grafana.

Структура бази даних спроєктована з урахуванням потреб зберігання часових рядів і подальшого аналізу технологічних параметрів. Основними таблицями є measurements, що містить первинні вимірювання; alarms, призначена для журналу аварій; setpoints, де зберігаються уставки технологічних параметрів; та equipment, яка містить інформацію про контрольоване обладнання. Така структура дозволяє забезпечити зручне архівування, пошук і аналіз даних. Програма PLC організована за модульним принципом. Основний організаційний блок викликає функціональні блоки обробки аналогових входів, контролю аварій, ПІД-регулювання та комунікації зі SCADA-сервером. Такий підхід підвищує зручність супроводу програмного забезпечення, спрощує внесення змін і дозволяє розширювати систему без повної перебудови її логіки. Людино-машинний інтерфейс реалізовано у вигляді адаптивного веб-застосунку на основі Node-RED Dashboard. Оператор отримує доступ до мнемосхеми технологічного процесу, поточних значень параметрів, трендів, журналу аварій та налаштувань уставок. Передбачено розмежування прав доступу для адміністратора, оператора та спостерігача. Для підвищення безпеки використовується автентифікація за логіном і паролем, а для віддаленого доступу – захищене з'єднання з використанням TLS.

Система аварійної сигналізації реалізована на апаратному та програмному рівнях. Апаратний рівень передбачає формування дискретних сигналів PLC і керування зовнішніми засобами сигналізації. Програмний рівень забезпечує відображення аварій у HMI, зміну кольору елементів мнемосхеми, запис

подій до журналу та надсилання повідомлень відповідальній особі. Контроль технологічних параметрів виконується за шкалою: норма, попередження, аварія та критична аварія.

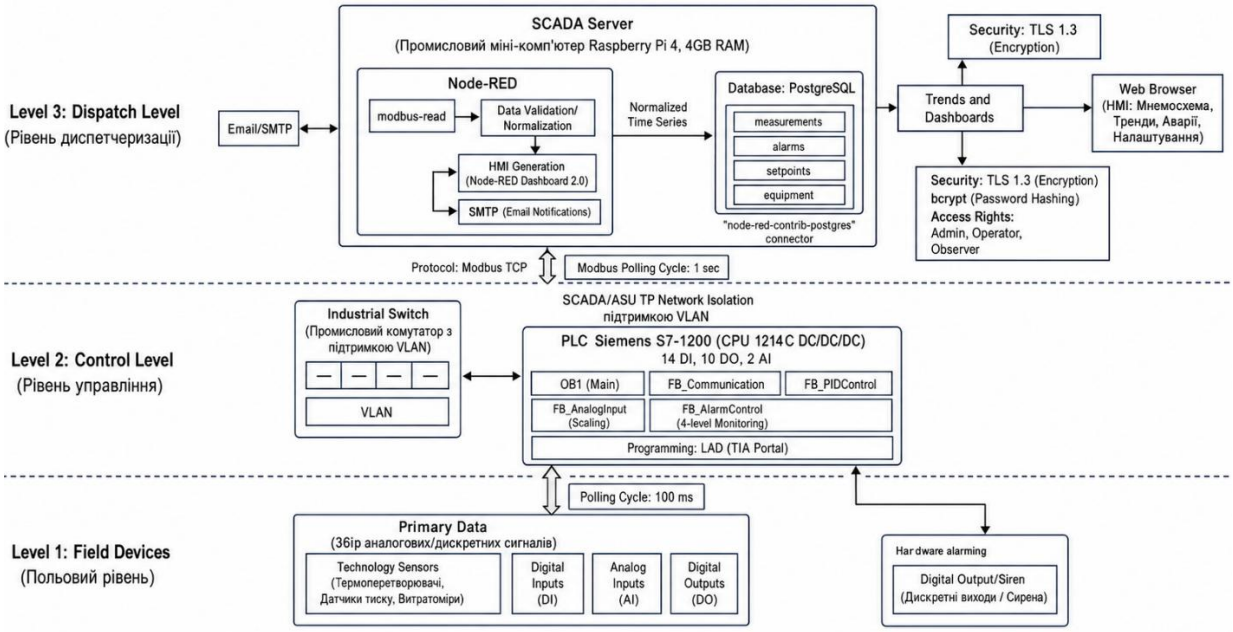

Рис.1. Принципова схема розробленої SCADA-системи

Розроблена SCADA-система є готовим до впровадження рішенням для малих і середніх промислових об’єктів. Вона поєднує надійність промислового PLC-керування, відкритість програмних засобів, можливість веб-доступу, архівування даних і гнучку систему аварійної сигналізації. Використання Siemens S7-1200, Modbus TCP, Node-RED, PostgreSQL і Grafana дозволяє створити функціональну, масштабовану та економічно доцільну систему диспетчеризації технологічного процесу.

Список використаних джерел:

1. Nițulescu I.V., Korodi A. Supervisory Control and Data Acquisition Approach in Node-RED: Application and Discussions. *IoT*. 2020. Vol. 1, No. 1. P. 76–91. URL: https://www.mdpi.com/2624-831X/1/1/5

2. He W., Taha A., Xu Y., Rekioua D. An Open-Source Supervisory Control and Data Acquisition System for Photovoltaic Monitoring. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 10. Article 2295. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/10/2295

3. Lin M.H. Node-RED Web-Based Monitor and Control of Power System Environment Using Raspberry Pi. *Sensors and Materials*. 2024. Vol. 36, No. 1. P. 355–367. URL: https://sensors.myu-group.co.jp/sm_pdf/SM3835.pdf

4. Siemens AG. Data Transfer to Microsoft Azure with an S7-1500. Siemens Industry Online Support. 2022. URL: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109772284/109772284_Datatransfer_Azure_S7-1500_DOKU_en.pdf

5. Rocha M.S., Sestito G.S., Dias A.L., Turcato A.C., Brandão D., Ferrari P. On the Performance of OPC UA and MQTT for Data Exchange between Industrial Plants and Cloud Servers. *Acta IMEKO*. 2019. Vol. 8, No. 2. P. 80–87. URL: https://acta.imeko.org/index.php/acta-imeko/article/view/IMEKO-ACTA-08%20%282019%29-02-11

УДК 658.7:681.5

Раданович В.Я., здобувач
Крижанівська І.В., професор
Ткачук А.Г., доцент
Державний університет «Житомирська політехніка»

СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ВИТРАТ СИРОВИНИ У ВИРОБНИЧОМУ ПРОЦЕСІ

Ефективне управління сировиною є критичним для стабільності виробництва та мінімізації витрат. В умовах нестабільної логістики актуальним стає впровадження автоматизованих систем моніторингу запасів. Це дозволяє прогнозувати потреби в матеріалах і уникати як дефіциту, так і надлишків.

У роботі розглядається система контролю сировинних витрат, що інтегрує методи CRS, EOQ та інтелектуальний аналіз даних. Завдяки використанню промислових IoT-пристроїв, датчиків маси та RFID-модулів забезпечується автоматизований збір даних про залишки в реальному часі. Центральний контролер опрацьовує отриману інформацію для аналізу динаміки витрат та прогнозування виробничих потреб підприємства.

Основним параметром оптимізації є економічний розмір замовлення EOQ, який визначається за формулою:

$$EOQ = \sqrt{\frac{2DS}{H}}$$

де D - річний попит на сировину; S - витрати на оформлення одного замовлення; H - витрати на зберігання одиниці продукції.

Аби забезпечити безперервність виробничого процесу використовується точка повторного замовлення:

$$ROP = d \cdot L + SS$$

де d - середній рівень споживання сировини; L - час постачання; SS - страховий запас.

Для прогнозування зміни витрат сировини застосовується модель ковзного середнього:

$$F_t = \frac{X_{t-1} + X_{t-2} + \cdots + X_{t-n}}{n}$$

де F_t - прогнозоване значення витрат; X_t - фактичні показники споживання сировини.

Інтелектуальна система аналізує виробничі параметри та виявляє аномальні відхилення витрат, що можуть бути спричинені несправністю обладнання, порушенням технологічного процесу або нераціональним використанням матеріалів. Показником ефективності роботи системи слугує коефіцієнт оптимізації запасів:

$$K_{opt} = \frac{Q_{fact}}{Q_{opt}}$$

де Q_{fact} - фактичні витрати сировини; Q_{opt} - оптимальне значення витрат.

Моделювання показало, що впровадження автоматизованої системи контролю дозволяє знизити перевитрати сировини на 15–25 %, скоротити витрати на зберігання матеріалів та підвищити ефективність виробничого процесу. Використання IoT-технологій та аналітичних алгоритмів забезпечує оперативне реагування на зміну виробничих умов і підвищує точність управління запасами.

Список використаних джерел:

1. Optimizing Raw Material Inventory Control with Continuous and Periodic Review. URL: https://www.researchgate.net/publication/383040978_Optimizing_Raw_Material_Inventory_Control_with_Continuous_and_Periodic_Review

2. Hidayat K., Efendi J., Faridz R. Economic Order Quantity Analysis for Raw Material Inventory. *Performa: Media Ilmiah Teknik Industri*. 2020. Vol. 18, No. 2. DOI: 10.20961/performa.18.2.35418.

УДК 681.5:004.4

Конопацька А.О., здобувач
Пуховський Є.С., професор
Державний університет «Житомирська політехніка»

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ МАТЕРІАЛУ ПІД ЧАС СУШІННЯ

Сучасні технологічні процеси сушіння широко застосовуються у деревообробній, харчовій, текстильній, аграрній та інших галузях промисловості. Якість сушіння безпосередньо впливає на фізико-механічні властивості матеріалу, його експлуатаційну придатність, енерговитрати та загальну продуктивність виробництва. Однією з основних проблем таких процесів є складність оперативного контролю вологості матеріалу, нерівномірність її розподілу в об'ємі заготовки та ризик виникнення дефектів унаслідок пересушування або недостатнього висушування. У зв'язку з цим актуальним є створення автоматизованої системи контролю вологості матеріалу під час сушіння, яка забезпечує безперервний моніторинг параметрів процесу та автоматичне коригування режимів роботи сушильної установки.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи контролю вологості матеріалу, що забезпечує підвищення якості сушіння, зменшення енергоспоживання та стабілізацію технологічних параметрів за рахунок використання датчиків вологості, температури, мікропроцесорного пристрою керування та виконавчих механізмів.

Основою запропонованої системи є комплекс технічних засобів, до складу якого входять датчики вологості матеріалу, датчики температури сушильного агента, мікроконтролер або програмований логічний контролер, блоки аналого-цифрового та цифро-аналогового перетворення, а також виконавчі механізми керування нагрівальними елементами, вентиляторами та системою подачі повітря. Дані з датчиків надходять до пристрою керування, де здійснюється їх обробка, порівняння з заданими значеннями та формування керуючих сигналів для підтримання оптимального режиму сушіння. У процесі роботи система здійснює безперервне вимірювання вологості матеріалу та температури середовища в сушильній камері. На основі отриманої інформації автоматично регулюються температура нагріву, інтенсивність циркуляції повітря та тривалість окремих етапів сушіння. Це дозволяє забезпечити більш рівномірне видалення вологи з матеріалу, зменшити ймовірність утворення тріщин, деформацій або внутрішніх напружень, а також уникнути надмірного споживання енергії. У сучасних автоматизованих системах контролю вологості можуть застосовуватися різні методи вимірювання: контактні, ємнісні, інфрачервоні, мікрохвильові та комбіновані. Контактні методи є простими у використанні, однак можуть бути обмежені за точністю в умовах високої температури або неоднорідної структури матеріалу. Інфрачервоні та безконтактні сенсори є перспективними для промислових сушильних установок, оскільки дозволяють виконувати вимірювання без порушення технологічного процесу. Використання комбінованих методів підвищує достовірність контролю та дає змогу враховувати особливості конкретного матеріалу.

Для підвищення якості керування доцільним є використання PID-регуляторів, нечіткої логіки або адаптивних алгоритмів. PID-регулювання дозволяє стабілізувати температуру та швидкість повітряного потоку, тоді як нечітка логіка може враховувати складні залежності між вологістю, температурою, часом сушіння та властивостями матеріалу. Такий підхід є особливо ефективним для процесів, у яких параметри об'єкта змінюються в часі та залежать від початкової вологості, товщини, щільності й структури матеріалу.

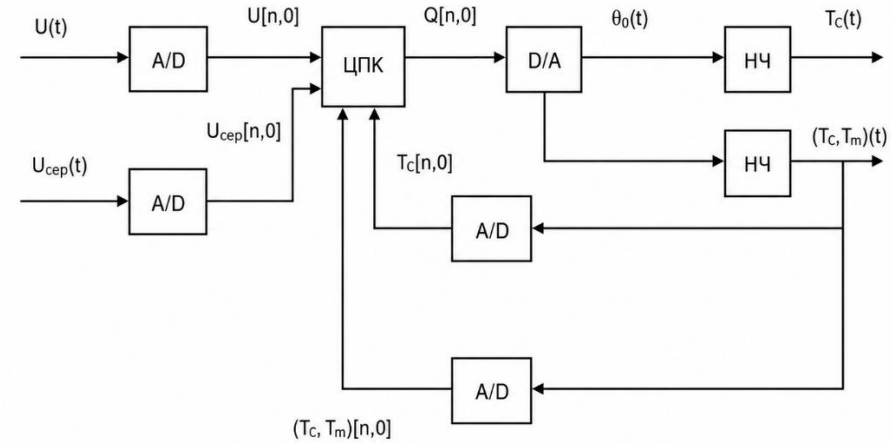

Рис.1. Функціональна схема цифрової автоматизованої системи керування процесом сушіння матеріалу

На функціональній схемі доцільно відобразити такі основні елементи: об’єкт сушіння, датчики вологості та температури, аналого-цифровий перетворювач, цифровий пристрій керування, блок формування керуючих сигналів, цифро-аналоговий перетворювач, виконавчі механізми та сушильну установку. Така структура дозволяє реалізувати замкнений контур керування, у якому поточні параметри процесу постійно порівнюються із заданими значеннями.

Впровадження автоматизованої системи контролю вологості матеріалу під час сушіння дозволяє підвищити точність підтримання технологічних параметрів, скоротити тривалість сушіння, зменшити витрати електроенергії, забезпечити рівномірне висушування матеріалу та знизити вплив людського фактора на процес. Крім того, накопичення даних про режими сушіння створює можливість для подальшого аналізу, оптимізації технології та прогнозування якості готової продукції.

Автоматизована система контролю вологості матеріалу є ефективним засобом підвищення якості процесу сушіння та оптимізації виробничих витрат. Подальший розвиток таких систем доцільно спрямувати на використання високоточних сенсорів нового покоління, IoT-технологій, інтелектуальних алгоритмів керування та засобів прогнозної аналітики, що дозволить забезпечити більш гнучке й енергоефективне керування сушильними процесами.

Список використаних джерел:

1. Dufour P. Control Engineering in Drying Technology: Review and Trends. *Drying Technology*. 2006. Vol. 24, No. 7. P. 889–904. DOI: 10.1080/07373930600734075. URL: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373930600734075

2. Dulău M., Madaras I. Development of a Monitoring and Control System for Timber’s Drying Process. *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 32. P. 545–552. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.02.251. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919302860

3. Boeri C.N., Da Silva F.N., Ferreira J. High Performance Controller for Drying Processes. *Acta Scientiarum. Technology*. 2013. Vol. 35, No. 2. P. 279–289. DOI: 10.4025/actascitechnol.v35i2.14775. URL: https://periodicos.uem.br/actascitechnol/index.php/ActaSciTechnol/article/download/14775/pdf/84864

4. Ortíz-Yescas G., Meléndez-Vázquez F., Quezada-Téllez L.A., Torres-Mendoza A., Morales-Peñaloza A., Fernández-Anaya G., Macías-Díaz J.E. A Hybrid PI–Fuzzy Control Scheme for a Drum Drying Process. *AppliedMath*. 2025. Vol. 5, No. 2. Article 45. DOI: 10.3390/appliedmath5020045. URL: https://www.mdpi.com/2673-9909/5/2/45

УДК 681.5:004.8

Яременко Д.В., здобувач
Доброжанський О.О., доцент
Крижанівська І.В., доцент
Державний університет «Житомирська політехніка»

. АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ У ПРОМИСЛОВОМУ ОБЛАДНАННІ ЗА ДАНИМИ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Сучасний розвиток промислового виробництва супроводжується зростанням складності технологічного обладнання та підвищенням вимог до його надійності. Непередбачені відмови та аварійні ситуації спричиняють значні економічні втрати, простої виробництва та загрозу безпеці персоналу. За даними міжнародних досліджень, до 42% незапланованих зупинок виробництва пов'язані з відмовами обладнання, які можна було виявити на ранніх стадіях. Впровадження автоматизованих систем діагностики на основі даних сенсорних мереж є актуальним напрямом підвищення ефективності та безпеки промислових підприємств. Традиційні підходи до технічного обслуговування обладнання – планово-попереджувальний ремонт та реактивне усунення наслідків відмов — мають суттєві недоліки. Планово-попереджувальний ремонт не враховує реальний технічний стан обладнання, що призводить до надмірних витрат або до пропуску фактичних несправностей. Реактивне обслуговування, у свою чергу, допускає повну відмову агрегату до початку ремонтних робіт. Ручний контроль параметрів є трудомістким, суб'єктивним та не забезпечує безперервного моніторингу у режимі реального часу. Усі ці чинники обумовлюють необхідність розробки автоматизованих інтелектуальних систем діагностики.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи діагностики аварійних режимів промислового обладнання, що використовує дані розподіленої сенсорної мережі для виявлення аномалій та класифікації несправностей у режимі реального часу.

Запропонована система складається з трьох рівнів: рівня збору даних, рівня обробки та аналізу, рівня прийняття рішень і сповіщення. На рівні збору даних розгорнута мережа сенсорів, що вимірюють вібрацію (акселерометри ADXL345), температуру (термопари типу K), струм споживання (датчики ACS712) та акустичну емісію. Дані передаються по протоколу Modbus RTU до програмованого логічного контролера (ПЛК) Siemens S7-1200. Рівень обробки реалізований на базі промислового комп'ютера з операційною системою реального часу. Програмне забезпечення розроблено з використанням Python та бібліотек scikit-learn і NumPy. Система виконує попередню фільтрацію сигналів (фільтр Баттерворта 4-го порядку), виділення ознак у часовій та частотній областях, а також класифікацію станів обладнання за допомогою алгоритму Random Forest. Рівень прийняття рішень формує сповіщення операторам через SCADA-систему та автоматично фіксує події в журналі несправностей. Реалізовано три рівні тривоги: попереджувальний, критичний та аварійний із відповідними протоколами реагування.

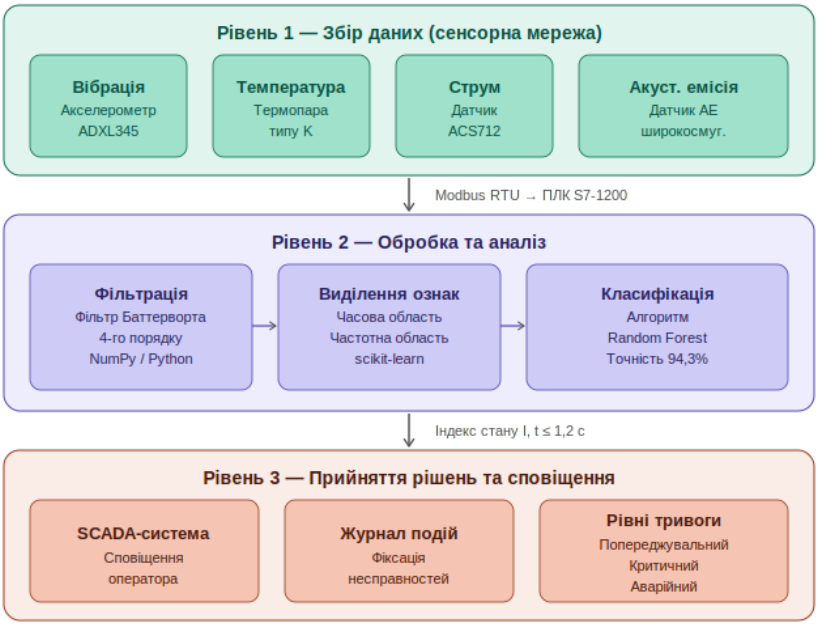

Рис.1. Структурна схема автоматизованої системи діагностики аварійних режимів

Виявлення аномалій ґрунтується на обчисленні узагальненого індексу стану обладнання:

$$I = w_1 \cdot \bar{V} + w_2 \cdot \bar{T} + w_3 \cdot \bar{I} + w_4 \cdot \bar{A}$$

де $\bar{V}$, $\bar{T}$, $\bar{I}$, $\bar{A}$ – нормовані значення вібрації, температури, струму та акустичної емісії відповідно; $w_1 \ldots w_4$ – вагові коефіцієнти, визначені методом експертних оцінок (w_1=0,35; w_2=0,25; w_3=0,25; w_4=0,15). При перевищенні порогового значення $I > 0{,}75$ система генерує сигнал тривоги.

Табл. 1.

Порогові значення індексу стану для різних рівнів тривоги

Рівень тривоги	**Діапазон індексу I**	**Дія системи**
Нормальний	$I \leq 0{,}50$	Моніторинг
Попереджувальний	$0{,}50 < I \leq 0{,}75$	Сповіщення оператора
Критичний	$0{,}75 < I \leq 0{,}90$	Підвищений контроль
Аварійний	$I > 0{,}90$	Зупинка обладнання

Апробація системи на імітаційному стенді з електродвигуном потужністю 7,5 кВт показала, що запропонований підхід забезпечує виявлення підшипникових дефектів та дисбалансу ротора на стадії до 85% розвитку несправності. Точність класифікації стану за тестовою вибіркою склала 94,3%. Час від виникнення аномалії до формування сигналу тривоги не перевищує 1,2 секунди, що є достатнім для своєчасного реагування обслуговуючого персоналу.

Розроблена автоматизована система діагностики на основі сенсорних мереж та алгоритмів машинного навчання дозволяє перейти від планово-попереджувального обслуговування до обслуговування за технічним станом, що суттєво знижує ризики аварійних зупинок та витрати на ремонт. Подальші дослідження передбачають інтеграцію системи з хмарними платформами та розширення набору класифікованих несправностей.

Список використаних джерел:

1. Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D. A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-Based Maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 1483–1510. DOI:10.1016/j.ymssp.2005.09.012.URL:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327005001512

2. Lei Y., Yang B., Jiang X., Jia F., Li N., Nandi A.K. Applications of Machine Learning to Machine Fault Diagnosis: A Review and Roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 138. Article 106587. DOI:10.1016/j.ymssp.2019.106587.URL:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327019308088

3. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001. Vol. 45, No. 1. P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324. URL: https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324

4. Gawde S., Patil S., Kumar S., Kamat P., Kotecha K., Abraham A. Multi-Fault Diagnosis of Industrial Rotating Machines Using Data-Driven Approach: A Review of Two Decades of Research. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 123. Article 106139. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106139. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197623003238

5. Medina-García J., Sánchez-Rodríguez T., Galán J.A.G., Delgado A., Gómez-Bravo F., Jiménez R. A Wireless Sensor System for Real-Time Monitoring and Fault Detection of Motor Arrays. *Sensors*. 2017. Vol. 17, No. 3. Article 469. DOI: 10.3390/s17030469. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/17/3/469

УДК 621.311:681.5

Токовмй Д., здобувач
Покляченко О.В., аспірант
Державний університет «Житомирська політехніка»

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ МІКРОМЕРЕЖІ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Сучасна електроенергетика активно впроваджує відновлювані джерела енергії, накопичувачі та інтелектуальні системи керування. Перспективним напрямом є створення мікромереж, які об'єднують сонячні панелі, вітрогенератори, акумуляторні батареї, резервні джерела живлення та керовані навантаження в єдину систему. Такі рішення підвищують енергоефективність, зменшують залежність від централізованої мережі та забезпечують надійне живлення споживачів. Однак робота мікромереж ускладнюється нестабільністю генерації відновлюваних джерел, що залежить від погодних умов, а також змінним характером електричного навантаження. Тому актуальним є розроблення алгоритмів оптимізації, які забезпечують раціональний розподіл енергії між джерелами генерації, накопичувачами, споживачами та зовнішньою мережею.

Метою роботи є аналіз принципів оптимізації режимів роботи мікромережі з відновлюваними джерелами енергії та обґрунтування структури системи енергетичного менеджменту, яка забезпечує мінімізацію витрат, максимальне використання відновлюваної енергії та підвищення надійності електропостачання.

Основним завданням оптимізації є вибір раціонального режиму роботи мікромережі в кожен момент часу: використання енергії від сонячних панелей і вітрогенераторів, заряджання або розряджання акумуляторів, підключення резервного генератора, а також купівля чи продаж електроенергії в зовнішню мережу. При цьому враховуються поточне навантаження, прогноз генерації ВДЕ, рівень заряду накопичувачів, вартість електроенергії та технічні обмеження обладнання. Ключовим елементом системи є EMS – система енергетичного менеджменту, яка збирає дані від джерел генерації, накопичувачів і споживачів, аналізує стан мікромережі та формує оптимальні керуючі дії. Узгоджена робота фотоелектричних панелей, вітрогенераторів, акумуляторів, резервних джерел і керованих навантажень забезпечує енергетичний баланс та ефективне використання ресурсів.

Особливе значення має врахування невизначеності генерації відновлюваних джерел. Для цього в системах оптимізації доцільно використовувати методи прогнозування, зокрема нейронні мережі, регресійні моделі або статистичні методи, які дозволяють передбачати рівень сонячної інсоляції, швидкість вітру та очікуване навантаження. Наявність прогнозної інформації дає змогу завчасно планувати заряд акумуляторів, зменшувати ризик дефіциту енергії та скорочувати обсяги вимушеного скидання надлишкової генерації.

Математично задача оптимізації режимів роботи мікромережі може бути подана через умову балансу потужності:

$$P_{PV}(t)+P_{WT}(t)+P_{bat}^{dis}(t)+P^{grid}_{buy}(t)=P_{load}(t)+P_{bat}^{ch}(t)+P_{grid}^{sell}(t)$$

де $P_{PV}(t)$ – потужність сонячної генерації; $P_{WT}(t)$ – потужність вітрогенератора; $P_{bat}^{dis}(t)$ – потужність розряду акумулятора; $P^{grid}_{buy}(t)$ – потужність, придбана із зовнішньої мережі; $P_{load}(t)$ – потужність навантаження; $P_{bat}^{ch}(t)$ – потужність заряду акумулятора; $P_{grid}^{sell}(t)$ – потужність, передана до зовнішньої мережі.

Під час оптимізації необхідно враховувати технічні обмеження системи. Одним із найважливіших є обмеження рівня заряду акумуляторної батареї:

$$SOCmin \le SOC(t) \le SOCmax$$

де $SOC(t)$ – поточний рівень заряду акумулятора; $SOCmin$ і $SOCmax$ – мінімально та максимально допустимі значення заряду, які визначаються умовами безпечної експлуатації та ресурсом батареї.

Для розв'язання задачі оптимізації можуть застосовуватися методи лінійного, нелінійного та динамічного програмування, а також інтелектуальні алгоритми, зокрема генетичні алгоритми, метод рою частинок і навчання з підкріпленням. Класичні методи ефективні для задач планування на добу наперед, тоді як методи штучного інтелекту краще підходять для складних сценаріїв із невизначеністю, змінними тарифами та динамічним навантаженням.

Економічний ефект оптимізації полягає у зменшенні витрат на закупівлю електроенергії, зниженні собівартості виробленої кВт·год та раціональному використанні накопичувачів. Екологічний ефект досягається за рахунок пріоритетного використання відновлюваної енергії та зменшення частки генерації від викопного палива.

Список використаних джерел:

1. Esparza A., Blondin M., Trovão J.P.F. A Review of Optimization Strategies for Energy Management in Microgrids. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 13. Article 3245. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/18/13/3245

УДК 629.331.621.3

Шишканов Д.А., здобувач
Громовий О.А., доцент
Державний університет «Житомирська політехніка»

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЗАРЯДНОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Стрімке зростання кількості електромобілів (EV) створює значне навантаження на локальні енергетичні мережі. Ефективне функціонування зарядної інфраструктури вимагає впровадження інтелектуальних систем керування для запобігання перевантаженням, оптимізації споживання енергії та забезпечення безперебійного доступу користувачів до послуг.

Наявні підходи часто базуються на статичному розподілі потужності, що призводить до низької ефективності використання мережі, тривалого часу очікування або необхідності дорогого оновлення кабельних ліній. Відсутність автоматизації моніторингу заважає оперативно реагувати на пікові навантаження в реальному часі.

Метою роботи є розробка структури та алгоритму функціонування автоматизованої системи керування зарядною інфраструктурою, що забезпечує динамічний розподіл потужності між станціями.

Пропонована система базується на трирівневій архітектурі: рівень польових пристроїв (контролери зарядних станцій), рівень передачі даних (протокол OCPP) та хмарний рівень керування. Система використовує мікроконтролер на базі ESP32 для кожної зарядної точки, що збирає дані про поточний стан батареї EV через датчики струму та напруги.

Алгоритм системи передбачає зчитування доступної потужності від ввідного щита та її пріоритетний розподіл між активними сесіями. Це дозволяє уникнути спрацювання захисної автоматики при одночасному підключенні багатьох авто. Використання мобільного додатка забезпечує користувачу можливість дистанційного моніторингу процесу заряджання.

Логіка керування описується моделлю балансування навантаження за формулою:

$$P_{total} \geq \sum_{i=1}^{n} P_i\,(t)$$

де P_{total} - загальна доступна потужність, P_i(t) — потужність, що споживається i -тою станцією в момент часу t.

Впровадження автоматизованої системи дозволяє підвищити ефективність використання існуючої енергомережі на 30–40% без її фізичної модернізації. Забезпечується зниження впливу людського фактора через повну автоматизацію процесів ідентифікації та оплати.

Запропоноване рішення оптимізує роботу зарядної мережі в умовах обмеженої потужності. Подальші дослідження будуть спрямовані на інтеграцію системи з відновлюваними джерелами енергії та системами зберігання енергії (ESS).

Список використаних джерел:

1. Maia Jr G.L., Montenegro A., Silva L.C.P., Rider M.J., Galvis J.J. EV Smart-Charging Strategy for Power Management in Distribution Systems. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 21. Article 5394. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/21/5394
2. Martins J.A., Gomes Á., Vale Z., Sousa T. Intelligent Monitoring Systems for Electric Vehicle Charging Stations in Parking Facilities: A Review. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 5. Article 2741. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/5/2741
3. Hsaini S., Ghogho M., Kobbane A., Benjelloun M. An OCPP-Based Approach for Electric Vehicle Charging Management. *Processes*. 2022. Vol. 10, No. 11. Article 2360. URL: https://www.mdpi.com/2227-9717/10/11/2360
4. Guillemin S., Ochoa L.F., Capuder T. Electrical Vehicle Smart Charging Using the Open Charge Point Interface. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 12. Article 2873. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/12/2873
5. Hossen M.S. AI-Driven Framework for Secure and Efficient Load Management in Multi-Station Electric Vehicle Charging Networks. *World Electric Vehicle Journal*. 2025. Vol. 16, No. 7. Article 370. URL: https://www.mdpi.com/2032-6653/16/7/370
6. Singh A.R., Bansal R.C., Kumar A. Optimizing Demand Response and Load Balancing in Smart Grid Systems with Electric Vehicles. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 29457. URL: https://www.nature.com/articles/s41598-024-82257-2

УДК 621.311:004.8

Шпаківський О., здобувач
Покляченко О.В., аспірант
Державний університет «Житомирська політехніка»

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З УРАХУВАННЯМ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ДАНИХ

Актуальність дослідження пов'язана з розвитком відновлюваної енергетики та необхідністю надійної інтеграції сонячних електростанцій в енергосистему. Генерація СЕС залежить від метеорологічних умов, зокрема сонячного випромінювання, температури, вітру та хмарності, тому має нестабільний характер. Це ускладнює планування енергобалансу й може спричиняти небаланси в мережі. Отже, створення системи точного прогнозування генерації СЕС є важливим завданням для підвищення стабільності енергосистеми та ефективності роботи об'єктів відновлюваної енергетики.

Метою роботи є розробка системи прогнозування генерації сонячної електростанції з урахуванням метеорологічних даних, телеметричної інформації з інверторного обладнання та методів машинного навчання.

Основним фактором, що визначає обсяг генерації сонячної електростанції, є інтенсивність сонячного випромінювання. Водночас для підвищення точності прогнозу необхідно враховувати температуру навколишнього середовища, температуру фотоелектричних модулів, швидкість вітру, тип хмарності та технічні характеристики панелей. Вихідна потужність фотоелектричного масиву може бути описана залежністю:

$$P = \eta \cdot A \cdot G \cdot [1 - \gamma(T_{cell} - T_{ref})]$$

де P – вихідна потужність сонячної електростанції; η – коефіцієнт корисної дії системи; A – площа фотоелектричних модулів; G – інтенсивність сонячного випромінювання; γ – температурний коефіцієнт потужності; T_{cell} – температура робочої комірки; T_{ref} – опорна температура.

Для задачі прогнозування генерації СЕС доцільно використовувати методи машинного навчання, зокрема рекурентні нейронні мережі LSTM, які ефективно працюють із часовими рядами та враховують попередні зміни погодних параметрів і виробітку електроенергії. На вхід моделі подаються дані прогнозу погоди, сонячної іррадіації, температури, швидкості вітру, хмарності, а також історичні показники генерації та параметри роботи інверторів.

Запропонована система включає модулі збору метеорологічних даних і телеметрії СЕС, попередньої обробки, очищення та нормалізації даних, нейромережевого прогнозування, базу даних і блок візуалізації результатів. Після підготовки даних LSTM-модель формує прогноз очікуваної генерації сонячної електростанції на заданий часовий інтервал.

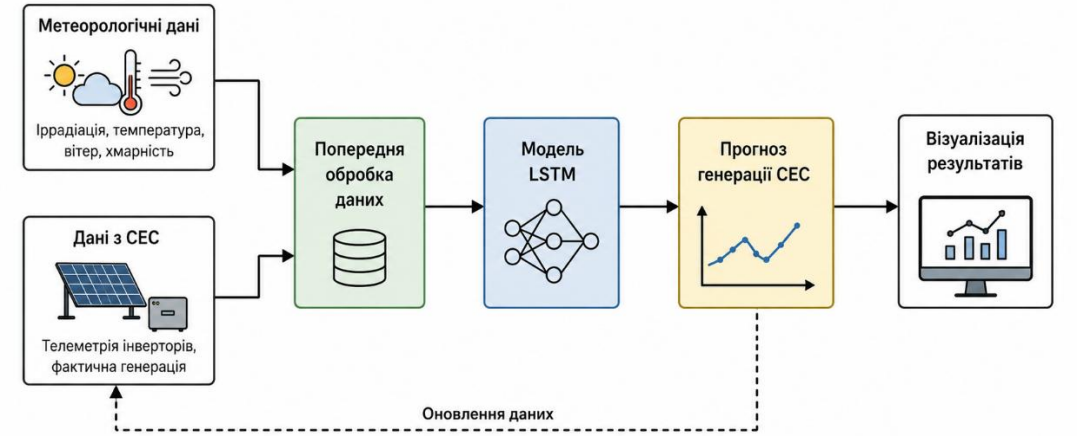

Рис.1. Структурна схема системи прогнозування генерації сонячної електростанції з урахуванням метеорологічних даних

Очікувана точність прогнозування для денного періоду може оцінюватися за показником MAPE. Досягнення значення похибки менше 10 % дозволяє використовувати систему для оперативного планування генерації, коригування заявок на ринку електроенергії та зменшення ризику небалансів. Впровадження такої системи дає можливість операторам СЕС більш точно планувати виробіток, підвищувати економічну ефективність станції та зменшувати штрафні санкції за відхилення від прогнозованого графіка.

Список використаних джерел:

1. Wang J. et al. Short-Term Photovoltaic Power Forecasting Using a Bi-LSTM Model and Meteorological Data. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 12. Article 5277. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/17/12/5277

УДК 621.311:004.8

Ніколаєнко М.С., здобувач
Янчук В.М., доцент
Ткачук Д.Ю., аспірантка
Державний університет «Житомирська політехніка»

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ДЕРЖАВНОГО КОРДОНУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

В умовах сучасних безпекових викликів надійний контроль державного кордону є критично важливим завданням. Велика протяжність прикордонних смуг та складні географічні умови роблять традиційне патрулювання недостатньо ефективним і ресурсомістким. Застосування інтелектуальних систем на базі комп'ютерного зору дозволяє забезпечити безперервний цілодобовий моніторинг великих територій, автоматизуючи процес виявлення загроз у режимі реального часу.

Головним недоліком наявних підходів до охорони кордону (фізичне патрулювання, використання простих інфрачервоних або сейсмічних датчиків руху) є високий вплив людського фактора, швидка втомлюваність операторів систем відеоспостереження та велика кількість хибних спрацьовувань через природні явища чи рух диких тварин. Це призводить до зниження пильності та затримок у реагуванні на реальні порушення.

Метою роботи є розробка архітектури та алгоритмічного забезпечення інтелектуальної автоматизованої системи моніторингу державного кордону на основі методів комп'ютерного зору для підвищення точності виявлення порушників і мінімізації хибних спрацьовувань.

Запропонована система будується на базі розподіленої архітектури граничних обчислень (Edge Computing). На контрольних вежах або безпілотних платформах встановлюються мультиспектральні оптико-електронні модулі, що включають RGB-камери високої роздільної здатності та тепловізійні сенсори для роботи вночі та за умов поганої видимості.

Первинна обробка відеопотоку виконується локально на спеціалізованих мікрокомп'ютерах. Для детекції об'єктів (людей, транспортних засобів, низьколітаючих БПЛА) застосовується оптимізована нейромережева модель архітектури YOLOv8. З метою стійкого супроводження виявлених цілей в умовах часткового перекриття об'єктів рослинністю використовується алгоритм трекінгу (наприклад, DeepSORT), який призначає кожному об'єкту унікальний ідентифікатор і прогнозує його траєкторію руху. У разі фіксації перетину визначеної «червоної лінії» система автоматично класифікує об'єкт, генерує тривожне сповіщення та передає на центральний пункт управління зашифрований пакет даних із координатами, типом об'єкта та коротким відеофрагментом, що суттєво розвантажує канали зв'язку.

Математична модель локалізації об'єкта в кадрі на основі обмежувального прямокутника (bounding box) для подальшого аналізу траєкторії описується координатами його центру:

$$x_c = \frac{x_{min} + x_{max}}{2}, \qquad y_c = \frac{y_{min} + y_{max}}{2}$$

де x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max} – координати меж виявленого об'єкта на зображенні, отримані на виході нейромережевого детектора.

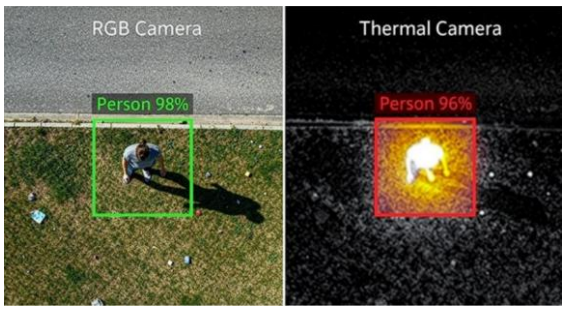

Рис. 1. Приклад роботи детектора на оптичному та тепловізійному зображенні

Запропонований підхід забезпечує автоматизацію процесу спостереження, знижує навантаження на особовий склад та гарантує високу ймовірність розпізнавання цілей незалежно від часу доби. Локальна обробка відеоданих на Edge-пристроях мінімізує мережеві затримки під час передачі сигналів тривоги.

Список використаних джерел:

1. Jocher, G., et al. "Ultralytics YOLOv8." URL: https://github.com/ultralytics/ultralytics (дата звернення: 20.04.2026).

УДК 681.5:631.234

Барабаш В.В., здобувач
Ткачук А.Г., доцент
Ткачук Д.Ю., аспірантка
Державний університет «Житомирська політехніка»

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ У ТЕПЛИЧНОМУ ГОСПОДАРСТВІ НА ОСНОВІ СЕНСОРНИХ ДАНИХ

Сучасне тепличне господарство потребує точного контролю температури, вологості повітря й ґрунту, освітленості та рівня CO_2, оскільки ці параметри безпосередньо впливають на ріст рослин, урожайність і якість продукції. Ручне регулювання є недостатньо ефективним, адже не забезпечує швидкої реакції на зміну умов і може спричиняти перевитрати води, електроенергії та тепла. Тому актуальним є впровадження автоматизованих систем, які на основі сенсорних даних безперервно аналізують стан середовища та формують керуючі дії для підтримання оптимального мікроклімату.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи керування мікрокліматом у тепличному господарстві на основі сенсорних даних, яка забезпечує моніторинг параметрів середовища та автоматичне керування виконавчими механізмами.

Запропонована система складається з датчиків температури й вологості повітря, датчиків вологості ґрунту, освітленості та концентрації CO_2, мікроконтролера або програмованого логічного контролера, блока обробки даних, виконавчих механізмів і людино-машинного інтерфейсу. Датчики здійснюють безперервне вимірювання параметрів мікроклімату, після чого отримані дані надходять до контролера. На основі порівняння фактичних значень із заданими уставками система визначає необхідні керуючі дії.

До виконавчих механізмів системи належать вентилятори, нагрівальні елементи, зволожувачі, клапани системи поливу, приводи відкривання фрамуг, насоси та системи штучного освітлення. Наприклад, у разі перевищення допустимої температури контролер активує вентиляцію або відкривання фрамуг, а при зниженні вологості ґрунту вмикає систему крапельного поливу. За недостатнього рівня освітленості може вмикатися додаткове світлодіодне освітлення.

Для формалізації роботи системи може використовуватися алгоритм порогового керування з гістерезисом або PID-регулювання. Спрощено умову керування температурою можна подати у вигляді:

$$u(t) = f(Tset - T(t))$$

де u(t)– керуючий вплив; Tset – задана температура; T(t) –поточне значення температури в теплиці.

Використання сенсорних даних дозволяє реалізувати замкнений контур керування, у якому параметри мікроклімату постійно контролюються та автоматично коригуються. Додатково система може зберігати історичні дані, будувати графіки зміни параметрів і формувати попередження у разі виходу показників за допустимі межі. Це створює основу для подальшого впровадження IoT-технологій, дистанційного моніторингу та інтелектуального аналізу даних.

Рис.1. Структурна схема автоматизованої системи керування мікрокліматом у тепличному господарстві на основі сенсорних даних

Очікуваним результатом впровадження такої системи є підвищення точності підтримання мікроклімату, зменшення витрат води та енергії, покращення умов росту рослин і підвищення врожайності. Крім того, автоматизація процесів вентиляції, поливу, обігріву та освітлення дозволяє знизити трудомісткість обслуговування теплиці й забезпечити стабільні умови вирощування незалежно від зміни зовнішнього середовища.

Список використаних джерел:

1. Săcăleanu D.-I., Matache M.-G., Roșu Ș.-G., Florea B.-C., Manciu I.-P., Perișoară L.-A. IoT-Enhanced Decision Support System for Real-Time Greenhouse Microclimate Monitoring and Control. *Technologies*. 2024. Vol. 12, No. 11. Article 230. URL: https://www.mdpi.com/2227-7080/12/11/230

УДК 681.5:631.67

Лабознюк Р.М., здобувач
Кравчук А.Р., доцент
Державний університет «Житомирська політехніка»

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПОЛИВУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР З УРАХУВАННЯМ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ

Сучасне сільське господарство потребує раціонального використання водних ресурсів, оскільки надмірний або недостатній полив негативно впливає на ріст рослин, урожайність і якість продукції. Традиційні методи поливу часто не враховують фактичну вологість ґрунту, погодні умови та потреби культури, що може призводити до перевитрат води або дефіциту вологи. Тому актуальним є впровадження інтелектуальної системи автоматизованого поливу, яка на основі сенсорних даних контролює стан ґрунту та автоматично керує подачею води.Метою роботи є розробка інтелектуальної системи автоматизованого поливу сільськогосподарських культур з урахуванням вологості ґрунту, яка забезпечує своєчасне вмикання та вимикання поливу на основі даних сенсорів і заданих агротехнічних параметрів.

Запропонована система складається з датчиків вологості ґрунту, датчиків температури та вологості повітря, мікроконтролера, блока обробки даних, електромагнітних клапанів, насоса, системи крапельного або дощувального поливу та інтерфейсу користувача. Датчики вологості встановлюються в кореневій зоні рослин і передають інформацію про фактичний стан ґрунту до контролера. На основі порівняння поточного значення вологості із заданим оптимальним діапазоном система формує керуючий сигнал для відкриття клапана або запуску насоса.

Спрощено умову керування поливом можна подати у вигляді:

$$u(t) = \begin{cases} 1, & W(t) < Wmin \\ 0, & W(t) \geq Wmax \end{cases}$$

де u(t) – керуючий сигнал системи поливу; W(t) – поточна вологість ґрунту; Wmin – мінімально допустиме значення вологості; Wmax – верхня межа оптимального діапазону вологості.

Для підвищення ефективності система може враховувати додаткові параметри: температуру повітря, прогноз опадів, фазу розвитку рослин, тип ґрунту та норму водоспоживання культури.

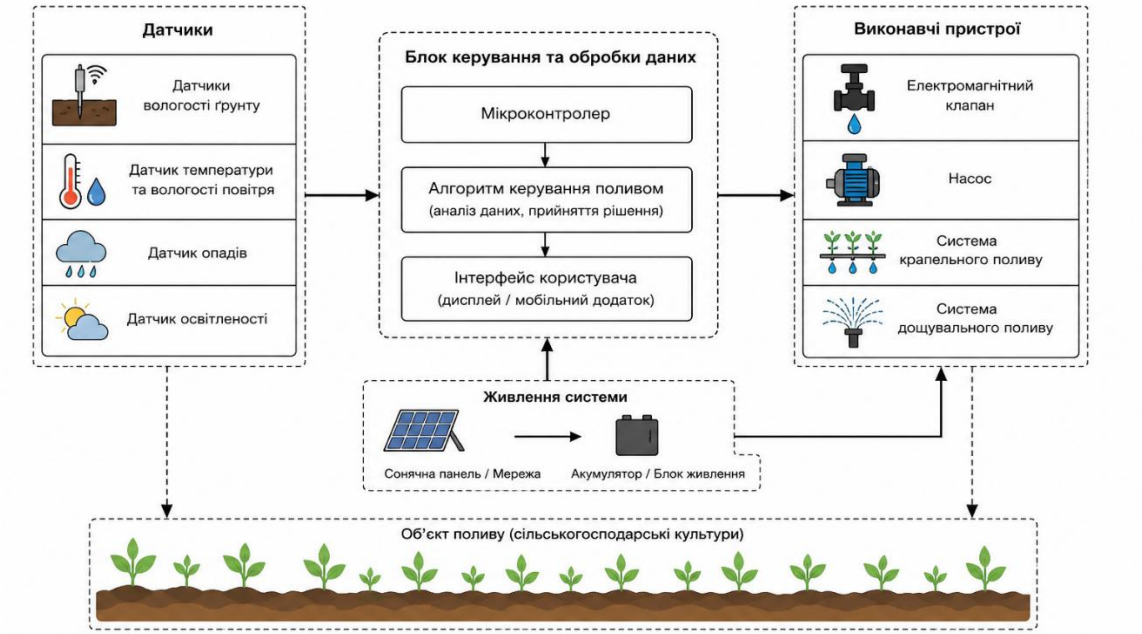

Рис.1. Структурна схема інтелектуальної системи автоматизованого поливу сільськогосподарських культур з урахуванням вологості ґрунту

Очікуваним результатом впровадження системи є зменшення витрат води, підвищення точності підтримання вологості ґрунту, покращення умов росту рослин і зниження трудомісткості обслуговування посівів. Крім того, накопичення даних про вологість ґрунту та режими поливу дозволяє аналізувати ефективність агротехнологічних заходів і коригувати стратегію зрошення.

Список використаних джерел:

1. Nsoh B. et al. Internet of Things-Based Automated Solutions Utilizing Machine Learning for Smart and Real-Time Irrigation Management: A Review. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 23. Article 7480. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/24/23/7480

УДК 681.5:631.15

Антонюк Р.О., здобувач
Кравчук А.Р., доцент
Ткачук Д.Ю., аспірантка
Державний університет «Житомирська політехніка»

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ЗБИРАННЯ ТА АНАЛІЗУ АГРОТЕХНІЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА

Сучасне сільськогосподарське виробництво потребує оперативного отримання, обробки та аналізу агротехнічної інформації, оскільки ефективність вирощування культур значною мірою залежить від своєчасного прийняття управлінських рішень. До таких даних належать показники вологості ґрунту, температури повітря, рівня освітленості, кількості опадів, стану посівів, витрат води, добрив і пального, а також параметри роботи сільськогосподарської техніки. Традиційне збирання цієї інформації вручну є трудомістким, недостатньо точним і не забезпечує швидкого реагування на зміну умов виробництва. Актуальність роботи зумовлена необхідністю впровадження автоматизованих систем, які дозволяють збирати агротехнічні дані в режимі реального часу, накопичувати їх у цифровому середовищі та використовувати для аналізу стану полів, прогнозування потреб рослин і оптимізації виробничих операцій. Такий підхід відповідає принципам точного землеробства та сприяє раціональному використанню ресурсів.

Метою роботи є розробка підходу до автоматизації процесів збирання та аналізу агротехнічних даних для підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва, зменшення витрат і покращення якості прийняття управлінських рішень.

Запропонована система може включати мережу польових сенсорів, метеостанції, GPS-модулі, безпілотні літальні апарати, мобільні пристрої оператора, центральний сервер або хмарну платформу, базу даних та аналітичний модуль. Польові датчики забезпечують вимірювання вологості й температури ґрунту, параметрів мікроклімату та стану навколишнього середовища. Дані з техніки можуть передаватися через GPS-трекери та контролери, що дозволяє оцінювати маршрути руху, витрати пального, площу обробітку та продуктивність виконання операцій. Після збирання інформація передається до програмного модуля, де виконується фільтрація, нормалізація, збереження та подальший аналіз. На основі отриманих даних система може формувати рекомендації щодо поливу, внесення добрив, планування польових робіт, виявлення зон із недостатньою вологістю або зниженим розвитком рослин. Для підвищення точності аналізу можуть застосовуватися методи машинного навчання, статистичного прогнозування та геоінформаційного моделювання. Узагальнено ефективність використання ресурсів у сільськогосподарському виробництві можна оцінити за показником:

$$E = \frac{Y}{R}$$

де E – ефективність виробництва; Y – отриманий урожай або обсяг продукції; R – сукупні витрати ресурсів, зокрема води, добрив, пального, електроенергії та праці.

Рис.1. Структурна схема автоматизованої системи збирання та аналізу агротехнічних даних

Впровадження автоматизованої системи дозволяє підвищити точність моніторингу стану полів, скоротити витрати ресурсів, зменшити вплив людського фактора та забезпечити більш обґрунтоване планування агротехнічних заходів. Крім того, накопичення історичних даних створює основу для прогнозування врожайності, аналізу ефективності технологічних операцій і переходу до елементів точного землеробства.

Список використаних джерел:

1. Elbasi E. et al. Optimizing Agricultural Data Analysis Techniques through the Use of Machine Learning and Remote Sensing. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 17. Article 8018. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/14/17/8018

УДК 623.4:681.5

Ткачук А.Г., доцент
Безвесільна О.М., професор
Державний університет «Житомирська політехніка»
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОЗБРОЄННЯ

Сучасні автоматизовані системи стабілізації озброєння легкої броньованої техніки є складними мехатронними комплексами, призначеними для забезпечення стабільного положення лінії прицілювання в умовах дії зовнішніх збурень, вібрацій, коливань корпусу об’єкта та динамічних навантажень. Ефективність таких систем значною мірою визначається точністю роботи чутливих елементів (ЧЕ), які формують інформацію про кутові швидкості, прискорення або відхилення стабілізованого об’єкта.

Одним із важливих чинників, що обмежує точність автоматизованої системи стабілізації, є наявність шумових складових у вихідному сигналі чутливого елемента. Власні шуми ЧЕ, дрейф нуля, квантування аналого-цифрового перетворення, температурні впливи та електромагнітні завади можуть призводити до помилкового формування сигналів керування, зростання коливальності системи, зниження точності наведення та погіршення динамічних характеристик стабілізації.

Тому експериментальне дослідження шумових характеристик чутливого елемента є необхідним етапом під час розроблення, налаштування та модернізації автоматизованих систем стабілізації озброєння.

Чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації озброєння можна розглядати як первинне джерело інформації про динамічний стан стабілізованого об’єкта. У загальному випадку вихідний сигнал сенсора має вигляд:

$$y(t)=x(t)+n(t)+b(t),$$

де $y(t)$ – виміряний сигнал; $x(t)$ – корисна складова, що відповідає реальному руху об’єкта; $n(t)$ – випадкова шумова складова; $b(t)$ – повільно змінний дрейф нуля або систематична похибка.

Під час експериментального дослідження ЧЕ встановлюється у нерухомому положенні, а корисна складова сигналу вважається близькою до нуля. У такому випадку зареєстрована часова реалізація переважно характеризує власні шуми та дрейф сенсорного каналу:

$$y(t)\approx n(t)+b(t).$$

Для оцінювання частотного складу шумової складової доцільно використовувати спектральний аналіз. Спектральна щільність потужності дозволяє визначити, у яких частотних діапазонах зосереджена основна енергія шуму та які компоненти можуть негативно впливати на роботу контуру стабілізації. Для зменшення впливу шумів доцільно застосовувати цифрову фільтрацію.

У межах експериментального дослідження було виконано реєстрацію вихідного сигналу ЧЕ автоматизованої системи стабілізації озброєння у статичному режимі. Такий режим дозволив оцінити власні шумові складові сенсорного каналу, дрейф нуля та наявність випадкових або імпульсних завад, які можуть впливати на якість формування сигналу зворотного зв’язку в контурі стабілізації. Встановлено, що навіть у нерухомому положенні вихідний сигнал ЧЕ не є сталим, а містить шумову складову, зумовлену власними електронними шумами, квантуванням аналого-цифрового перетворення, нестабільністю живлення, температурними впливами та зовнішніми електромагнітними завадами. Це підтверджує необхідність урахування шумових параметрів чутливого елемента під час синтезу алгоритмів стабілізації та цифрової обробки вимірювального сигналу.

За результатами статистичної обробки часової реалізації сигналу було визначено середнє значення, дисперсію та середньоквадратичне відхилення вихідного сигналу. Отримані результати свідчать, що шумова складова має стохастичний характер і повинна враховуватися під час побудови математичної моделі вимірювального каналу.

Список використаних джерел:

1. Ткачук А.Г. Математична модель п’єзоелектричного чутливого елемента стабілізатора озброєння. Журнал «Наука і техніка сьогодні». 2023. №11(25). С. 724-736

УДК 623.4:681.5

Безвесільна О.М., професор
Ткачук А.Г., доцент
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Державний університет «Житомирська політехніка»

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ КЕРУВАННЯ СТАБІЛІЗАТОРОМ ОЗБРОЄННЯ З УРАХУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА

Одним із чинників, що впливає на енергоспоживання стабілізатора озброєння, є якість сигналу чутливого елемента (ЧЕ). Шуми, дрейф нуля та високочастотні завади у вимірювальному каналі можуть призводити до формування надлишкових керуючих дій. У результаті електропривод стабілізатора здійснює корекції, які не покращують точність наведення, але збільшують споживання енергії, нагрівання силових елементів та зношування механічної частини. Тому актуальним є розроблення підходу до енергоефективного керування стабілізатором озброєння з урахуванням реальних характеристик чутливого елемента.

Стабілізатор озброєння можна розглядати як замкнену автоматизовану систему керування, у якій чутливий елемент формує сигнал зворотного зв’язку про кутове положення, кутову швидкість або прискорення стабілізованого об’єкта.

Надмірні коливання керуючого сигналу спричиняють зростання струму електродвигуна, часті реверси, додаткові пускові режими та втрати у силовому перетворювачі. Це знижує енергетичну ефективність стабілізатора та може погіршувати його тепловий режим. Для зменшення впливу шумів ЧЕ доцільно застосовувати цифрову фільтрацію. Однак, надмірне згладжування сигналу ЧЕ може призводити до часової затримки, що негативно впливає на швидкодію стабілізатора. Тому вибір параметрів фільтрації має здійснюватися із урахуванням компромісу між зменшенням шуму та збереженням динамічної точності системи. Для енергоефективного керування доцільно використовувати критерій, який враховує не лише похибку стабілізації, а й енергетичні витрати.

У процесі проведеного дослідження встановлено, що характеристики ЧЕ мають прямий вплив на енергетичні показники стабілізатора озброєння. Зокрема, підвищений рівень шуму у вимірювальному каналі спричиняє збільшення амплітуди та частоти зміни керуючого сигналу. Це призводить до зростання струму електропривода, збільшення втрат у силовому перетворювачі та підвищення енергоспоживання системи.

Проведений аналіз показав, що найбільш небезпечними є шумові складові, частоти яких потрапляють у робочу смугу контуру стабілізації. Такі завади не пригнічуються природною інерційністю системи та можуть викликати реальні мікропереміщення виконавчого механізму. У результаті привід виконує додаткову механічну роботу, яка не сприяє підвищенню точності стабілізації.

Врахування характеристик ЧЕ дозволяє оптимізувати параметри цифрової фільтрації та регулятора. Зокрема, застосування фільтрації з адаптивним вибором параметрів дає змогу зменшити рівень високочастотних завад у сигналі зворотного зв’язку. Це знижує амплітуду паразитної складової керуючого сигналу та зменшує надмірну активність електропривода.

Очікуваний ефект від запропонованого підходу: зменшення непродуктивних мікрокорекцій електропривода; зниження середнього струму споживання; зменшення теплового навантаження на силові елементи; підвищення ресурсу електромеханічної частини стабілізатора та інш.

Таким чином, енергоефективне керування стабілізатором озброєння має базуватися не лише на мінімізації похибки стабілізації, а й на обмеженні надлишкових керуючих дій, спричинених шумами та похибками чутливого елемента.

Список використаних джерел:

1. Ткачук А.Г. Математична модель п’єзоелектричного чутливого елемента стабілізатора озброєння. Журнал «Наука і техніка сьогодні». 2023. №11(25). С. 724-736.
2. Ткачук А.Г. Адаптивні алгоритми керування електроприводами стабілізаторів озброєння з метою підвищення енергоефективності та точності наведення. Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». 2025. №2(33). С. 30-36.
3. Енергоефективні стратегії керування електроприводами у системах Smart Grid / А.Г. Ткачук, А.А. Гуменюк, О.О. Добржанський, А.Р. Кравчук, М.В. Богдановський // Технічна інженерія. - 2025. - № 2 (96). - С. 78-85.
4. Ткачук А.Г. Використання принципів Smart Grid у стабілізаторах озброєння для оптимізації розподілу електроенергії. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 359(6.1). С. 485-489.