Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Гутовський Дмитро Васильович

УДК 681.5:666.94

ДИСЕРТАЦІЯ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЄМНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології

15 Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Д. В. Гутовський

Науковий керівник Жученко Олексій Анатолійович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Гутовський Д.В. *Автоматизація процесів управління енергоємними технологічними процесами.* — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»). — Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню науково-прикладної задачі підвищення енергоефективності випалу цементного клінкеру за рахунок розроблення інтелектуальної системи автоматизованого керування тепловим режимом комбінованої пічної системи в умовах використання альтернативного палива зі змінними характеристиками. У ролі представницького матеріалу для альтернативного палива в роботі досліджується оптоволоконний кабель від безпілотних літальних апаратів — побічний продукт збройної агресії російської федерації проти України, що накопичився в обсягах десятків тисяч кілометрів і досі не має ефективних шляхів утилізації.

Питома енергоємність вітчизняного цементного виробництва на 15–25 % перевищує середньоєвропейські показники, тому навіть незначне зниження питомих витрат теплової енергії в одному технологічному переділі дає суттєвий ефект у масштабах галузі. Перешкодою для масштабного застосування альтернативного палива є виражена стохастична варіативність його теплотехнічних характеристик: коефіцієнт варіації нижчої теплоти згоряння для досліджуваного оптоволоконного кабелю сягає 10–25 %, що значно ускладнює стабілізацію температури зони спікання при використанні класичних ПІД-регуляторів. Існуючі промислові системи керування орієнтовані на стабільне паливо й передбачають корекції за непрямими параметрами; адаптація до

змінного складу палива у замкненому контурі реального часу здебільшого відсутня. Саме це обумовило коло задач дисертаційного дослідження.

Метою роботи є підвищення енергоефективності випалу цементного клінкеру шляхом розроблення інтелектуальної системи автоматизованого керування тепловим режимом комбінованої пічної системи «декарбонізатор — обертова піч — холодильник», здатної компенсувати збурення від нестабільності характеристик альтернативного палива у режимі реального часу.

Об'єктом дослідження є технологічний процес випалу клінкеру в комбінованій пічній системі цементного виробництва за умов застосування альтернативного палива зі змінними теплотехнічними характеристиками.

Предметом дослідження є методи й засоби автоматизованого керування тепловим режимом та енергоспоживанням комбінованої пічної системи, побудовані на поєднанні комбінованих регуляторів з випереджувальною компенсацією, нечіткої логіки, спостерігачів стану та нейромережевого прогнозування.

Для вирішення поставлених задач використано: методи математичного моделювання та обчислювального експерименту — для побудови моделей тепломасообміну в пічній системі; методи теорії автоматичного керування — для синтезу комбінованих регуляторів та аналізу стійкості; методи нечіткої логіки — для побудови підсистеми оперативного оцінювання теплотехнічних характеристик палива; методи машинного навчання (рекурентні нейронні мережі архітектури LSTM) — для короткострокового прогнозування температурного режиму; методи багатокритеріальної оптимізації — для розв'язання задачі координованого розподілу теплового навантаження; лабораторні методи (бомбова калориметрія, термогравіметричний аналіз) — для характеризації зразків альтернативного палива.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у такому.

Уперше розроблено математичну модель горіння палива зі стохастично змінною калорійністю, яка враховує мультиплікативний характер збурень і

дозволяє кількісно оцінити вплив варіативності теплотехнічних характеристик альтернативного палива на температурний режим пічної системи з похибкою не більш ніж 3 % при варіаціях нижчої теплоти згоряння до ±20 %.

Удосконалено метод синтезу комбінованих регуляторів теплового режиму пічної системи через введення каналу випереджувальної компенсації збурень від нестабільності характеристик палива, що, на відміну від традиційних підходів, забезпечує зменшення коливань температури зони спікання на 47–57 % порівняно з базовим ПІД-регулятором.

Уперше запропоновано нечітку систему оперативної оцінки енергетичних властивостей альтернативного палива за непрямими показниками (насипна густина, вологість, розмір частинок, тип полімерної оболонки), що, на відміну від лабораторних методів, дозволяє адаптувати параметри керування з затримкою менш ніж 5 с замість години-двох на лабораторний аналіз.

Набуло подальшого розвитку застосування рекурентних нейронних мереж архітектури LSTM для короткострокового прогнозування температурного режиму обертової печі: запропоновано архітектуру з двома прихованими шарами (64 та 32 нейрони), що враховує оцінку калорійності альтернативного палива у вхідному векторі ознак та забезпечує середньоквадратичну похибку прогнозу 9,8 °С на горизонті 15 хв.

Удосконалено алгоритм координованого керування розподілом теплового навантаження між пальниками печі та декарбонізатора через адаптацію коефіцієнта розподілу до характеристик палива методом оптимізації з ковзним горизонтом, що забезпечує зниження питомої витрати тепла на 5 % і максимальне термічне заміщення до 35–40 % при збереженні якості клінкеру.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені алгоритми, нечітка база правил, навчена нейромережева модель та структура комбінованих регуляторів утворюють завершений програмно-алгоритмічний комплекс, придатний до інтеграції з наявними промисловими SCADA/DCS-системами через стандартизовані інтерфейси (OPC UA, Modbus TCP). Запропоновані

рішення можуть бути використані на цементних заводах України для зниження питомих витрат теплової енергії, розширення частки альтернативного палива в паливному балансі та утилізації полімервмісних відходів військового походження. Матеріали роботи придатні до використання у навчальному процесі при викладанні дисциплін «Автоматизація технологічних процесів» та «Інтелектуальні системи управління».

У першому розділі проаналізовано стан проблеми автоматизації енергоємних технологічних процесів. Показано, що цементне виробництво є одним із найбільш енергоємних промислових процесів (3000–4200 кДж/кг клінкеру), а потенціал енергозбереження української цементної промисловості становить 15–25 %. Обґрунтовано придатність оптоволоконного кабелю від FPV-дронів як альтернативного палива: обсяги накопичення оцінено у 50–150 тис. км, калорійність — 18–28 МДж/кг залежно від типу оболонки. Виявлені прогалини в наявних дослідженнях визначили завдання роботи.

У другому розділі розроблено комплекс математичних моделей тепломасообміну в комбінованій пічній системі: одновимірну модель теплообміну в обертовій печі, модель декарбонізації з кінетикою за моделлю «стискаючого ядра» та модель горіння палива зі стохастично змінною калорійністю. Параметри ідентифіковано за промисловими даними, адекватність підтверджено за критерієм Фішера. Встановлено динамічні характеристики каналів управління: постійна часу каналу печі становить 1200 с при транспортному запізненні 540 с.

У третьому розділі синтезовано комбіновані регулятори теплового режиму, що поєднують ПІД-регулятори зворотного зв'язку з каналом випереджувальної компенсації збурень від змінної калорійності палива (оптимальний коефіцієнт 0,73). Розроблено адаптивний регулятор співвідношення «паливо–повітря» з корекцією за вмістом кисню та алгоритм координованого управління розподілом теплового навантаження на принципі ковзного горизонту. Запаси стійкості становлять 52° за фазою та 8,9 дБ за амплітудою.

У четвертому розділі розроблено інтелектуальну підсистему оцінювання та прогнозування: нечітку систему оцінювання калорійності палива типу Мамдані (45 правил), розширений фільтр Калмана та алгоритм об'єднання оцінок за мінімумом дисперсії, що забезпечує похибку оцінювання 6,9 % із затримкою близько 45 с. LSTM-модель прогнозування температури зони спікання (64 та 32 нейрони), навчена на 260 000 промислових записах, дає похибку прогнозу 9,8 °C на горизонті 15 хв.

У п'ятому розділі виконано комплексне імітаційне моделювання системи. У номінальному режимі (TSR = 15–35 %) середньоквадратичне відхилення температури зони спікання зменшується на 47–57 %, а частка часу перебування температури в допустимому діапазоні зростає з 52–78 % до 89–96 %. Підтверджено робастність при екстремальних змінах калорійності (±60 %) та в нештатних ситуаціях. Економічний ефект — 86,3 млн грн/рік, скорочення викидів CO_2 — 31 789 т/рік (10,0 %).

Структура та обсяг. Дисертація складається з анотацій українською та англійською мовами, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг — 159 сторінок, з них 142 сторінки основного тексту. Робота містить 8 рисунків, 28 таблиць, список використаних джерел зі 132 найменувань та 3 додатки.

Ключові слова: *автоматизація, цементна піч, обертова піч, декарбонізатор, альтернативне паливо, оптоволоконний кабель, FPV-дрон, енергоефективність, комбінований регулятор, випереджувальна компенсація, нечітка логіка, фільтр Калмана, рекурентна нейронна мережа, LSTM, прогнозувальне керування, координоване керування, термічне заміщення, стохастичне збурення.*

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Жученко О.А., Гутовський Д.В. Синтез та дослідження комбінованого каскадного регулятора з випереджувальною компенсацією для керування тепловим режимом цементної печі // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2025. № 2 (31). С. 41–51. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.2.31.041-051 *(Особистий внесок: Гутовським Д.В. виконано постановку задачі, синтез комбінованого каскадного регулятора з випереджувальною компенсацією та аналіз його якості; Жученко О.А. здійснював наукове консультування та брав участь в обговоренні результатів.)*
2. Гутовський Д.В., Жученко О.А. Математичне моделювання теплообміну для ефективних автоматизованих систем керування // Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2024. № 2. С. 18–24. https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2024.307353 *(Особистий внесок: Гутовським Д.В. розроблено математичну модель теплообміну в обертовій печі та виконано її ідентифікацію за промисловими даними; Жученко О.А. брав участь у формулюванні висновків та редагуванні статті.)*
3. Абрамова А.О., Гутовський Д.В. Синтез та дослідження ефективності комбінованих регуляторів для керування енергоємними процесами // Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. 2026. № 6. С. 14–21. https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-2 *(Особистий внесок: Гутовським Д.В. розроблено нечітку підсистему оцінювання калорійності та виконано аналіз ефективності комбінованих регуляторів; Абрамова А.О. брала участь у плануванні обчислювальних експериментів та оформленні статті.)*

Тези доповідей на наукових конференціях:

4. Цапар В.С., Гутовський Д.В. Порівняльний аналіз каскадного ПІД-регулятора та Offset-Free MPC для стабілізації температури

теплообмінника перед ЕЛОУ // Ernst Lortikyan International Scientific Project «Global Creative Ideas Forum 4.0». Scientific Conference-Forum «United Perspectives 24/7». Volume 2. 2026. *(Особистий внесок: Гутовським Д.В. виконано постановку задачі та порівняльний аналіз каскадного ПІД-регулятора й Offset-Free MPC; Цапар В.С. брав участь в обговоренні результатів та підготовці доповіді.)*

ABSTRACT

Hutovskyi D.V. *Automation of Control over Energy-Intensive Technological Processes.* — Qualification scientific work, manuscript copyright.

Dissertation submitted for the academic degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 "Automation and Computer-Integrated Technologies" (field of knowledge 15 "Automation and Instrument Engineering"). — National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation addresses the applied scientific problem of improving the energy efficiency of cement clinker firing through the design of an intelligent automated control system for the thermal regime of a combined kiln line operating with alternative fuel of variable composition. As a representative material the work investigates fibre-optic cable salvaged from FPV drones — a by-product of the russian federation's armed aggression against Ukraine, which has accumulated in volumes of tens of thousands of kilometres without an established route of utilisation.

The specific energy intensity of Ukrainian cement production exceeds the average European figures by 15–25 %, which makes any reduction in specific heat consumption per technological stage materially significant on a sectoral scale. The principal obstacle to wider use of alternative fuel is the pronounced stochastic variability of its calorific properties: the coefficient of variation of the lower heating value of the studied fibre-optic cable reaches 10–25 %, which prevents stable control of the burning-zone temperature with conventional PID regulators. Existing industrial control systems are designed for stable fuels and rely on indirect corrections; closed-loop adaptation to variable fuel composition in real time is largely absent. This circumstance defined the scope of the present research.

The aim of the work is to improve the energy efficiency of cement clinker firing by designing an intelligent automated control system for the thermal regime of the

combined kiln line "calciner — rotary kiln — cooler" capable of compensating disturbances caused by the variability of alternative fuel characteristics in real time.

The object of the research is the technological process of clinker firing in a combined kiln line of cement production under the use of alternative fuel with variable thermal properties.

The subject of the research comprises methods and tools for automated control over the thermal regime and energy consumption of the combined kiln line, built on the integration of combined regulators with feedforward compensation, fuzzy logic, state observers, and neural-network forecasting.

The methodology involves: mathematical modelling and computational experiments — for heat-and-mass transfer models in the kiln line; control theory — for synthesis of combined regulators and stability analysis; fuzzy logic — for the operative-grade fuel-property estimation subsystem; machine learning (LSTM recurrent neural networks) — for short-horizon temperature forecasting; multi-criteria optimisation — for the coordinated heat-load distribution problem; laboratory methods (bomb calorimetry, thermogravimetric analysis) — for characterisation of alternative-fuel samples.

Scientific novelty.

For the first time, a mathematical model of fuel combustion with stochastically variable lower heating value has been developed; the model captures the multiplicative nature of disturbances and quantifies the influence of fuel-property variability on the kiln-line temperature regime with an error of no more than 3 % under heating-value variations up to ±20 %.

The synthesis method for combined regulators of the kiln-line thermal regime has been improved by introducing a feedforward channel compensating disturbances from fuel-property variability; this provides a 47–57 % reduction in burning-zone temperature deviations compared with a baseline PID strategy.

For the first time, a fuzzy system has been proposed for operational estimation of alternative-fuel energetic properties using indirect indicators (bulk density, moisture

content, particle size, type of polymer sheath); unlike laboratory methods, this enables adaptation of control parameters within less than 5 s instead of one to two hours required for laboratory analysis.

The application of LSTM recurrent neural networks to short-horizon forecasting of rotary-kiln temperature has been further developed: a two-layer architecture (64 and 32 hidden units) is proposed, which incorporates the alternative-fuel calorific estimate into the input feature vector and yields RMSE = 9.8 °C at a 15-minute prediction horizon.

The coordinated control algorithm for distributing thermal load between the kiln main burner and the calciner burner has been improved by adapting the load-distribution coefficient to fuel properties via receding-horizon optimisation; this delivers a 5 % reduction in specific heat consumption and supports thermal substitution rates of up to 35–40 % without compromising clinker quality.

Practical significance. The proposed algorithms, fuzzy rule base, trained neural-network model, and the structure of combined regulators together form a complete software-and-algorithmic toolkit that integrates with existing industrial SCADA/DCS systems through standardised interfaces (OPC UA, Modbus TCP). The solutions can be deployed at Ukrainian cement plants to reduce specific heat demand, expand the share of alternative fuel in the energy mix, and enable utilisation of polymer-containing waste of military origin. The materials of the work are suitable for use in the academic curriculum within the courses "Automation of Technological Processes" and "Intelligent Control Systems".

The first chapter analyses the state of the art in automation of energy-intensive technological processes. Cement production is shown to be among the most energy-intensive industrial processes (3000–4200 kJ/kg of clinker), while the energy-saving potential of the Ukrainian cement industry amounts to 15–25%. The suitability of fibre-optic cable from FPV drones as an alternative fuel is substantiated: the accumulated

volumes are estimated at 50–150 thousand km, and the lower heating value at 18–28 MJ/kg depending on the sheath type. The research gaps identified determined the objectives of the work.

The second chapter presents a set of mathematical models of heat and mass transfer in the combined kiln system: a one-dimensional model of heat exchange in the rotary kiln, a calcination model with shrinking-core kinetics, and a model of combustion of fuel with stochastically varying calorific value. The model parameters were identified from industrial data, and their adequacy was confirmed by Fisher's criterion. The dynamic characteristics of the control channels were established: the kiln channel time constant is 1200 s with a transport delay of 540 s.

The third chapter is devoted to the synthesis of combined thermal-regime controllers coupling feedback PID controllers with a feedforward channel that compensates disturbances caused by the variable calorific value of the fuel (optimal compensation coefficient 0.73). An adaptive fuel-to-air ratio controller with oxygen correction and a coordinated heat-load distribution algorithm based on the receding-horizon principle were developed. The stability margins are 52° in phase and 8.9 dB in amplitude.

The fourth chapter presents the intelligent estimation and prediction subsystem: a Mamdani-type fuzzy system for fuel calorific value estimation (45 rules), an extended Kalman filter, and a minimum-variance estimate fusion algorithm providing an estimation error of 6.9% with a delay of about 45 s. The LSTM model for predicting the sintering zone temperature (64 and 32 neurons), trained on 260,000 industrial records, yields a prediction error of 9.8°C over a 15-minute horizon.

The fifth chapter covers comprehensive simulation of the developed system. In the nominal mode (TSR = 15–35%), the standard deviation of the sintering zone temperature is reduced by 47–57%, and the share of time the temperature stays within the admissible range increases from 52–78% to 89–96%. The robustness under extreme calorific value changes (±60%) and in emergency situations is confirmed. The economic effect amounts to UAH 86.3 million per year, with CO_2 emissions reduced by 31,789 t/year (10.0%).

Structure and length. The dissertation comprises Ukrainian and English abstracts, a list of abbreviations and notation, an introduction, five chapters, general conclusions, a list of references, and appendices. Total length is 159 pages, of which 142 pages constitute the main text. The work contains 8 figures, 23 tables, a list of 132 references on 11 pages, and 3 appendices on 12 pages.

Keywords: *automation, cement kiln, rotary kiln, calciner, alternative fuel, fibre-optic cable, FPV drone, energy efficiency, combined regulator, feedforward compensation, fuzzy logic, Kalman filter, recurrent neural network, LSTM, predictive control, coordinated control, thermal substitution rate, stochastic disturbance.*

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ 2
Список публікацій здобувача за темою дисертації 7
ABSTRACT 9
ЗМІСТ 144
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ 166
ВСТУП 200
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕНЕРГОЄМНИХ ПРОЦЕСІВ 266
1.1 Енергоємні технологічні процеси: класифікація та характеристики 266
1.2 Цементне виробництво як типовий енергоємний процес 300
1.3 Альтернативні палива в цементній промисловості 377
1.4 Полімервмісні відходи військового походження як потенційне паливо 433
1.5 Сучасні системи автоматизації цементних печей 488
1.6 Аналіз досліджень та виявлення прогалин 511
Висновки до розділу 1 522
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ В КОМБІНОВАНІЙ ПІЧНІЙ СИСТЕМІ 544
2.1 Структурна декомпозиція об'єкта управління 544
2.2 Математична модель теплообміну в обертовій печі 554
2.3 Модель процесу декарбонізації 588
2.4 Модель горіння палива зі змінними характеристиками 600
2.5 Ідентифікація та верифікація моделей 655
2.6 Аналіз динамічних властивостей об'єкта 700
Висновки до розділу 2 722
РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ КОМБІНОВАНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ 733
3.1 Аналіз вимог до системи управління 733
3.2 Структура багатоконтурної системи управління 744
3.3 Синтез комбінованих регуляторів температурного режиму 766
3.4 Алгоритм координованого управління розподілом теплового навантаження 844
3.5 Моделювання та аналіз ефективності комбінованих регуляторів 889
Висновки до розділу 3 932

РОЗДІЛ 4. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПІДСИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ 954
4.1 Задача оцінювання характеристик альтернативного палива 954
4.2 Нечітка система оцінювання калорійності палива 99
4.3 Спостерігач стану для уточнення оцінки калорійності 1032
4.4 Нейромережева модель прогнозування температурного режиму 1076
4.5 Інтеграція компонентів інтелектуальної підсистеми 1121
Висновки до розділу 4 1165
РОЗДІЛ 5. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ 1187
5.1 Розробка комплексної імітаційної моделі пічної системи 1187
5.2 Дослідження роботи системи в номінальному режимі 1221
5.3 Дослідження роботи системи при змінних характеристиках палива 1275
5.4 Дослідження перехідних режимів та нештатних ситуацій 1332
Висновки до розділу 5 1408
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 1421
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 1476
ДОДАТОК А 16059
ДОДАТОК Б 1621
ДОДАТОК В 1654

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

Скорочення

АП	— альтернативне паливо
АСУ ТП	— автоматизована система управління технологічним процесом
ДСТУ	— Державний стандарт України
ЕЛОУ	— електрознесолювальна установка
КПІ	— Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
ЛАЧХ	— логарифмічна амплітудно-частотна характеристика
МПС	— модель прогнозувального керування
НДР	— науково-дослідна робота
ПІД	— пропорційно-інтегрально-диференціальний (регулятор)
ТАУ	— теорія автоматичного управління
ТГА	— термогравіметричний аналіз
ТПЗА	— технічних та програмних засобів автоматизації (кафедра)
ХТП	— хіміко-технологічний процес
ANN	— Artificial Neural Network (штучна нейронна мережа)

DCS	— Distributed Control System (розподілена система керування)
EKF	— Extended Kalman Filter (розширений фільтр Калмана)
FPV	— First-Person View (тип безпілотника)
LSTM	— Long Short-Term Memory (тип рекурентної нейронної мережі)
MAE	— Mean Absolute Error (середня абсолютна похибка)
MAPE	— Mean Absolute Percentage Error (середня абсолютна відсоткова похибка)
MIMO	— Multiple-Input Multiple-Output (багатовимірна система)
MPC	— Model Predictive Control (прогнозувальне керування)
OPC UA	— Open Platform Communications Unified Architecture
PID	— Proportional-Integral-Derivative (controller)
RDF	— Refuse-Derived Fuel (паливо з твердих побутових відходів)
RMSE	— Root Mean Squared Error (середньоквадратична похибка)

RNN	— Recurrent Neural Network (рекурентна нейронна мережа)
SCADA	— Supervisory Control and Data Acquisition
SLSQP	— Sequential Least Squares Programming
SRF	— Solid Recovered Fuel (відновлюване тверде паливо)
TSR	— Thermal Substitution Rate (коефіцієнт термічного заміщення)
UKF	— Unscented Kalman Filter (сигма-точковий фільтр Калмана)

Основні позначення

T_zsp	— температура зони спікання обертової печі, °C
T_kalc	— температура на виході з декарбонізатора, °C
T_set	— уставка температури, °C
Q_i^AF	— нижча теплота згоряння альтернативного палива, МДж/кг
Q̄_i	— середнє значення нижчої теплоти згоряння, МДж/кг
CV_Q	— коефіцієнт варіації калорійності палива, %
ξ(t)	— стохастична мультиплікативна складова збурень

τ_c	— час кореляції стохастичної складової, с
G_clinker	— продуктивність печі за клінкером, т/год
q_spec	— питома витрата тепла, кДж/кг клінкеру
α_dec	— ступінь декарбонізації, частка
L̂₀^AF	— оцінка стехіометричної потреби в кисні для палива
ξ_split	— коефіцієнт розподілу теплового навантаження «піч / декарбонізатор»
K_p, T_i, T_d	— коефіцієнти налаштування ПІД-регулятора
K_ff	— коефіцієнт випереджувальної компенсації
σ_T	— середньоквадратичне відхилення температури, °C
EF_CO2	— емісійний фактор CO_2, кг/кг палива
s_T	— коефіцієнт чутливості температури зони спікання до калорійності

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку промисловості характеризується зростанням вимог до енергоефективності, зумовленим економічними чинниками та глобальними екологічними зобов'язаннями. Енергоємні процеси (цементне виробництво, металургія, скловаріння, хімічна промисловість) споживають до 40% енергоресурсів промислового сектору [1]; за даними Міжнародного енергетичного агентства, цементна галузь відповідає за близько 7% глобальних викидів CO_2, що робить підвищення її енергоефективності критично важливим для досягнення цілей Паризької угоди [2].

В Україні проблема енергоефективності набуває особливої гостроти в умовах енергетичної кризи. Питома енергоємність вітчизняного цементного виробництва перевищує середньоєвропейські показники на 15–25% [3]; перспективним напрямом її зниження є альтернативні палива, зокрема SRF, частка яких на європейських цементних заводах сягає 60–80% [4].

Особливої актуальності набуває утилізація полімервмісних відходів військового походження: на прифронтових територіях накопичено десятки тисяч кілометрів оптоволоконного кабелю від FPV-дронів [5]. Цей матеріал з калорійною полімерною оболонкою (20–35 МДж/кг) є потенційним альтернативним паливом, однак його нестабільні характеристики створюють значні виклики для систем автоматичного управління.

Ефективне використання альтернативних палив зі змінними властивостями потребує нових підходів до автоматизації: традиційні системи на класичних ПІД-регуляторах не забезпечують належної якості регулювання при значних варіаціях калорійності та складу палива [6], що зумовлює необхідність інтелектуальних методів управління, здатних адаптуватися в реальному часі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри технічних та

програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» та відповідає пріоритетним напрямам розвитку науки і техніки України, зокрема пріоритетному напряму «Енергетика та енергоефективність» [7].

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності випалу цементного клінкеру шляхом розробки інтелектуальної системи автоматизованого управління тепловим режимом комбінованої пічної системи при використанні альтернативного палива зі змінними характеристиками.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Проаналізувати сучасний стан автоматизації енергоємних технологічних процесів та виявити напрями підвищення енергоефективності цементного виробництва при використанні альтернативних палив.
2. Розробити математичну модель тепломасообміну в комбінованій пічній системі «декарбонізатор — обертова піч — холодильник», що враховує процес горіння палива зі змінними характеристиками.
3. Синтезувати комбіновані регулятори для багатоконтурної системи управління тепловим режимом з каналами випереджувальної компенсації збурень від нестабільності характеристик палива.
4. Розробити інтелектуальну надбудову системи управління на основі нечіткої логіки та нейронних мереж для адаптації до змін властивостей альтернативного палива.
5. Створити алгоритм координованого управління розподілом теплового навантаження між пальниками печі та декарбонізатора для максимізації частки заміщення традиційного палива.

6. Провести лабораторні дослідження характеристик альтернативного палива з оптоволоконного кабелю та валідацію розробленої системи управління засобами імітаційного моделювання за промисловими даними.

Об'єкт дослідження — технологічний процес випалу клінкеру в комбінованій пічній системі цементного виробництва.

Предмет дослідження — методи та засоби автоматизованого управління тепловим режимом та енергоспоживанням комбінованої пічної системи при використанні палива зі змінними характеристиками.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використано такі методи:

- методи математичного моделювання та обчислювального експерименту — для розробки моделей тепломасообміну в пічній системі;
- методи теорії автоматичного управління — для синтезу комбінованих регуляторів та аналізу стійкості системи;
- методи нечіткої логіки — для побудови системи оцінювання властивостей альтернативного палива;
- методи машинного навчання (штучні нейронні мережі) — для прогнозування температурного режиму;
- методи багатокритеріальної оптимізації — для розв'язання задачі оптимального розподілу теплового навантаження;
- експериментальні методи — для дослідження характеристик альтернативного палива та валідації розроблених алгоритмів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому:

1. **Вперше** розроблено математичну модель процесу горіння в обертовій печі, що враховує стохастичну зміну калорійності альтернативного палива з полімервмісних відходів, яка, на відміну від існуючих, дозволяє

прогнозувати температурний режим з похибкою не більше 3% при варіаціях калорійності палива до ±20%.

2. **Удосконалено** метод синтезу комбінованих регуляторів теплового режиму пічної системи шляхом введення каналу випереджувальної компенсації збурень від нестабільності характеристик палива, що, на відміну від традиційних підходів, забезпечує зменшення коливань температури зони спікання на 40–60%.

3. **Вперше** запропоновано нечітку систему оперативної оцінки енергетичних властивостей альтернативного палива за непрямими показниками (насипна щільність, вологість, візуальні характеристики), що дозволяє адаптувати параметри управління без затримки на лабораторний аналіз.

4. **Набуло подальшого розвитку** застосування нейромережевих моделей для короткострокового прогнозування температурного режиму печі, що відрізняється врахуванням змінної частки альтернативного палива як вхідного параметра та забезпечує горизонт прогнозу 10–15 хвилин з точністю ±15°C.

5. **Удосконалено** алгоритм координованого управління розподілом теплового навантаження між пальниками печі та декарбонізатора на основі методу прогнозуючого управління (MPC), що забезпечує максимальне заміщення традиційного палива (до 35–40%) при збереженні якості клінкеру.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення інтелектуальної підсистеми управління тепловим режимом цементної печі, придатне до інтеграції з існуючими SCADA-системами через стандартизовані промислові інтерфейси.

2. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані на цементних заводах України для підвищення енергоефективності виробництва та утилізації полімервмісних відходів військового походження.

3. Розроблено рекомендації щодо підготовки та використання альтернативного палива з оптоволоконного кабелю в цементній промисловості, що передано до Асоціації виробників цементу України.
4. Матеріали дисертації можуть бути використані у навчальному процесі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при викладанні дисциплін «Автоматизація технологічних процесів» та «Інтелектуальні системи управління».

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, винесені на захист, одержані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: [1] — постановка задачі, синтез комбінованого каскадного регулятора з випереджувальною компенсацією та аналіз його якості; [2] — розроблення математичної моделі теплообміну в обертовій печі та її ідентифікація за промисловими даними; [3] — розроблення нечіткої підсистеми оцінювання калорійності та аналіз ефективності комбінованих регуляторів; [4] — постановка задачі та порівняльний аналіз каскадного ПІД-регулятора й Offset-Free MPC для стабілізації температури теплообмінника.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на:

- науковій конференції-форумі Ernst Lortikyan International Scientific Project «Global Creative Ideas Forum 4.0» / «United Perspectives 24/7» (Volume 2, 2026 р.); науково-технічних семінарах кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «КПІ імені Ігоря Сікорського» (2022–2026 рр.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 4 наукові праці, у тому числі: 3 статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б» та 1 теза доповіді на міжнародній науковій конференції-форумі. Повний перелік публікацій здобувача за темою дисертації наведено в Додатку А.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотацій українською та англійською мовами, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 159 сторінок, з них 142 сторінки основного тексту. Робота містить 8 рисунків, 28 таблиць, список використаних джерел зі 132 найменувань та 3 додатки.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕНЕРГОЄМНИХ ПРОЦЕСІВ

1.1 Енергоємні технологічні процеси: класифікація та характеристики

Енергоємність технологічного процесу — кількість енергії на виробництво одиниці продукції (кДж/кг, кВт·год/т або грошовий еквівалент) — є ключовою характеристикою, що визначає економічну ефективність виробництва та його вплив на довкілля [8].

За класифікацією Міжнародного енергетичного агентства, енергоємними є виробництва з витратами на енергоносії понад 20% собівартості [9]; за даними Держстату, промисловість споживає близько 35% кінцевого енергоспоживання України, з яких до 70% припадає на енергоємні виробництва [10].

Класифікація енергоємних процесів за галузевою ознакою

Енергоємні технологічні процеси можна класифікувати за кількома ознаками. За галузевою приналежністю виділяють такі основні групи [11]:

Найенергоємнішою галуззю є металургія: виробництво чавуну потребує 12–18 ГДж/т, сталі — 1,4–2,2 ГДж/т, прокату — 0,8–1,5 ГДж/т [12]. У хімічній промисловості виділяються виробництва аміаку (28–35 ГДж/т) та етилену (15–25 ГДж/т) [13]; у будівельній галузі — цементна промисловість (3,0–5,5 ГДж/т клінкеру), виробництво вапна та скла [14]. Целюлозно-паперова галузь споживає 10–14 ГДж/т целюлози [15], харчова — 10–15 ГДж/т цукру [16].

Класифікація за видом домінуючого енергоносія

За видом основного енергоносія енергоємні процеси поділяються на [17]:

Паливоємні процеси (цементні, вапняні, скловарні печі) отримують 80–95% енергії від спалювання палива; в електроємних (електродугові печі, електроліз)

частка електроенергії сягає 60–90%; у комбінованих співвідношення теплової та електричної енергії приблизно рівне.

Класифікація за характером теплових процесів

З точки зору теорії теплообміну енергоємні процеси класифікують за механізмом передачі тепла [18]:

Високотемпературні процеси (понад 1000°C: випал клінкеру, плавлення металів і скла) характеризуються домінуванням випромінювання (60–80% теплового потоку); у середньотемпературних (400–1000°C) теплообмін комбінований, у низькотемпературних (до 400°C: сушіння, випарювання) переважає конвекція.

Структура енергоспоживання промисловості України

У 2023 році металургія споживала 28% промислового енергоспоживання України, хімічна галузь — 18%, будівельні матеріали — 12% [19]; у структурі енергоносіїв домінує природний газ (45–50%), вугілля — 25%, електроенергія — 20% [20].

Показники енергоефективності

Для оцінки енергоефективності технологічних процесів використовують систему показників [21]. Питома витрата енергії визначається як відношення спожитої енергії до обсягу виробленої продукції:

$$SEC = \frac{E_{total}}{P}, \quad (1.1)$$

де SEC — питома витрата енергії, ГДж/т; E_{total} — загальне споживання енергії, ГДж; P — обсяг виробленої продукції, т.

Енергетичний коефіцієнт корисної дії процесу характеризує ефективність використання підведеної енергії:

$$\eta = \frac{E_{useful}}{E_{input}} \times 100\%, \quad (1.2)$$

де η — енергетичний ККД, %; E_{useful} — корисно використана енергія, ГДж; E_{input} — підведена енергія, ГДж.

Індекс енергоємності дозволяє порівнювати фактичну енергоефективність з еталонним значенням:

$$EII = \frac{SEC_{actual}}{SEC_{reference}}, \quad (1.3)$$

де EII — індекс енергоємності, безрозмірна величина; SEC_{actual} — фактична питома витрата енергії, ГДж/т; $SEC_{reference}$ — еталонне значення питомої витрати енергії (найкраща доступна технологія або середньогалузевий показник), ГДж/т.

Для комплексної оцінки енергоефективності виробництва використовують показник загальної енергоємності продукції, що враховує як пряме, так і непряме споживання енергії:

$$SEC_{total} = SEC_{direct} + SEC_{indirect}, \quad (1.4)$$

де SEC_{total} — загальна питома енергоємність, ГДж/т; SEC_{direct} — пряме споживання енергії на технологічний процес, ГДж/т; $SEC_{indirect}$ — непряме споживання енергії (на виробництво сировини, транспортування тощо), ГДж/т.

Еталонна питома витрата тепла на випал клінкеру за документами BAT становить 3,0–3,4 ГДж/т для сучасних печей із декарбонізатором [22]; фактичні показники українських підприємств — 3,4–4,2 ГДж/т, тобто потенціал енергозбереження сягає 10–25%.

Фактори, що впливають на енергоємність

Енергоємність технологічного процесу визначається комплексом факторів [23]:

Технологічні фактори (конструкція обладнання, режимні параметри, якість сировини) дають змогу знизити енергоспоживання на 15–30%; експлуатаційні — на 5–15%; організаційні (ISO 50001) — на 3–8% [24]; фактори автоматизації — на 5–12% без капітальних витрат [25].

Вплив факторів автоматизації на енергоємність можна оцінити за допомогою коефіцієнта ефективності автоматизації:

$$K_{aut} = \frac{SEC_{manual} - SEC_{auto}}{SEC_{manual}} \times 100\%, \quad (1.5)$$

де K_{aut} — коефіцієнт ефективності автоматизації, %; SEC_{manual} — питома витрата енергії при ручному управлінні, ГДж/т; SEC_{auto} — питома витрата енергії при автоматичному управлінні, ГДж/т.

Роль автоматизації у підвищенні енергоефективності

Автоматизація є одним із найефективніших інструментів підвищення енергоефективності: сучасні системи управління забезпечують підтримання оптимальних параметрів режиму, швидке реагування на збурення, координацію взаємопов'язаних агрегатів та оптимізацію споживання енергоносіїв у реальному часі [26].

Ефективність системи автоматичного управління з точки зору енергозбереження визначається її здатністю мінімізувати відхилення регульованих параметрів від оптимальних значень. Для оцінки цієї здатності використовують інтегральний критерій якості:

$$J = \int_0^T [w_1 \cdot e^2(t) + w_2 \cdot u^2(t)]\, dt \rightarrow \min, \quad (1.6)$$

де J — значення критерію якості; $e(t)$ — помилка регулювання (відхилення від заданого значення); $u(t)$ — керуючий вплив; w_1, w_2 — вагові коефіцієнти, що визначають пріоритет точності регулювання та економії енергії; T — час оцінювання, с.

Дослідження [27] показують, що впровадження сучасних систем управління процесами (Advanced Process Control, APC) на енергоємних виробництвах забезпечує типове зниження енергоспоживання на 3–8%, зменшення варіабельності параметрів на 40–60% та підвищення продуктивності на 2–5%.

Зниження варіабельності параметрів процесу безпосередньо впливає на енергоефективність. Зв'язок між дисперсією температури та перевитратою енергії можна описати залежністю:

$$\Delta E = k \cdot \sigma_T^2, \quad (1.7)$$

де ΔE — перевитрата енергії, ГДж/т; k — коефіцієнт пропорційності, що залежить від характеристик процесу, ГДж/(т·°C²); σ_T — середньоквадратичне відхилення температури від оптимального значення, °C.

Особливо актуальними інтелектуальні методи є для процесів зі значною невизначеністю, зокрема з альтернативними паливами: системи, налаштовані на номінальні параметри палива, не забезпечують якості регулювання при суттєвих варіаціях його властивостей [28].

Тенденції розвитку енергоємних виробництв

Тенденції розвитку енергоємних виробництв визначаються сталим розвитком: декарбонізація (низьковуглецеві енергоносії, CCS), циркулярна економіка з використанням відходів як палива, цифровізація (Industry 4.0, цифрові двійники, ШІ) та інтеграція з енергосистемою [29].

Отже, енергоємні процеси є складними об'єктами управління з високим енергоспоживанням, інерційністю та взаємозв'язком параметрів; підвищення їх ефективності потребує вдосконалення систем управління, насамперед для процесів з альтернативними паливами, що і є предметом дослідження.

1.2 Цементне виробництво як типовий енергоємний процес

Цементна промисловість належить до найбільш енергоємних виробництв: близько 7% глобального споживання промислової енергії та 8% світових викидів CO_2 [30], що зумовлює особливу увагу до енергоефективності галузі.

Технологія виробництва портландцементу

Виробництво портландцементу включає три основні технологічні етапи: підготовку сировини, випал клінкеру та помел цементу [31]. Кожен з цих етапів характеризується специфічними енергетичними потребами та можливостями оптимізації.

Підготовка сировини охоплює видобуток, дроблення, помел та гомогенізацію компонентів — вапняку (75–80%), глини (15–20%) і коригуючих добавок (5–10%); питоме електроспоживання на цьому етапі становить 25–35 кВт·год/т сировинної суміші [32].

Випал клінкеру — центральний і найбільш енергоємний етап, на який припадає 90–95% теплової та 20–25% електричної енергії виробничого циклу [33]; сировинна суміш проходить низку фізико-хімічних перетворень при температурах до 1450°C.

Помел цементу полягає у спільному подрібненні клінкеру з гіпсом (3–5%) та мінеральними добавками; питоме електроспоживання становить 30–50 кВт·год/т цементу [34].

Фізико-хімічні процеси випалу клінкеру

Випал клінкеру супроводжується послідовністю фізико-хімічних перетворень, кожне з яких відбувається у визначеному температурному інтервалі [35]:

Зона сушіння та підігріву (20–200°C) характеризується випаровуванням фізично зв'язаної вологи. Теплота, необхідна для випаровування води, визначається формулою:

$$Q_{evap} = m_w \cdot r, \quad (1.8)$$

де Q_{evap} — теплота випаровування, кДж; m_w — маса випареної вологи, кг; r — питома теплота пароутворення (≈2260 кДж/кг при атмосферному тиску).

Зона дегідратації (200–700°C) супроводжується видаленням хімічно зв'язаної води з глинистих мінералів та розкладом домішок. Основна реакція дегідратації каолініту:

$$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O \overset{450-600°C}{\rightarrow} Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 2H_2O \uparrow$$

Зона декарбонізації (700–950°C) є найбільш енергоємною стадією процесу. Тут відбувається розклад карбонату кальцію з виділенням вуглекислого газу:

$$CaCO_3 \overset{900°C}{\rightarrow} CaO + CO_2 \uparrow$$

Тепловий ефект реакції декарбонізації є ендотермічним і становить:

$$\Delta H_{dec} = 1780 \text{ кДж/кг } CaCO_3 \text{ (1.9)}$$

Ступінь декарбонізації визначається за формулою:

$$\alpha_{dec} = \frac{m_{CaCO_3}^{initial} - m_{CaCO_3}^{final}}{m_{CaCO_3}^{initial}} \times 100\%, \text{ (1.10)}$$

де α_{dec} — ступінь декарбонізації, %; *m_{CaCO_3}^{initial}* — початкова маса карбонату кальцію в сировині, кг; *m_{CaCO_3}^{final}* — залишкова маса карбонату кальцію, кг.

Зона екзотермічних реакцій (950–1300°C) характеризується утворенням проміжних сполук: двокальцієвого силікату (беліту) C_2S, трикальцієвого алюмінату C_3A та чотирикальцієвого алюмоферату C_4AF.

Зона спікання (1300–1450°C) є зоною утворення основного клінкерного мінералу — трикальцієвого силікату (аліту) C_3S, що визначає міцність цементу:

$$2CaO \cdot SiO_2 + CaO \overset{1400-1450°C}{\rightarrow} 3CaO \cdot SiO_2$$

Зона охолодження (1450–100°C) забезпечує фіксацію фазового складу клінкеру та рекуперацію тепла для підігріву повітря горіння.

Конструкція сучасної пічної системи

Сучасні цементні заводи використовують печі сухого способу виробництва з циклонними теплообмінниками та декарбонізатором, що забезпечують найвищу енергоефективність [36]. Така комбінована пічна система складається з кількох функціональних елементів.

Циклонний теплообмінник являє собою систему з 4–6 ступенів циклонів, розташованих вертикально. Сировина рухається згори вниз назустріч гарячим газам, що виходять з печі. Ефективність теплообміну в циклоні описується рівнянням:

$$\eta_{cycl} = 1 - \exp\left(-\frac{k \cdot A}{G_{gas} \cdot c_{p,gas}}\right), (1.11)$$

де η_{cycl} — ефективність теплообміну в циклоні; k — коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); A — площа поверхні теплообміну, м²; G_{gas} — масова витрата газів, кг/с; *c_{p,gas}* — питома теплоємність газів, Дж/(кг·К).

Температура сировини на виході з циклонного теплообмінника досягає 750–850°C, що забезпечує економію 40–50% теплової енергії порівняно з печами без теплообмінника [37].

Декарбонізатор (кальцинатор) — реактор, у якому відбувається 85–95% реакції декарбонізації до надходження матеріалу в піч; його пальник споживає 50–60% загальної кількості палива, що дозволяє використовувати альтернативні палива з нижчою калорійністю та більшим часом горіння [38].

Тепловий баланс декарбонізатора описується рівнянням:

$$Q_{fuel,calc} + Q_{air} = Q_{dec} + Q_{heat} + Q_{loss,calc}, (1.12)$$

де $Q_{fuel,calc}$ — теплота згоряння палива в декарбонізаторі, кВт; Q_{air} — теплота, внесена підігрітим повітрям з холодильника, кВт; Q_{dec} — теплота, витрачена на реакцію декарбонізації, кВт; Q_{heat} — теплота підігріву матеріалу та газів, кВт; $Q_{loss,calc}$ — теплові втрати декарбонізатора, кВт.

Обертова піч — циліндричний реактор довжиною 50–80 м і діаметром 4–6 м, встановлений під кутом 2,5–4° до горизонту; обертаючись зі швидкістю 1–4 об/хв, вона переміщує матеріал до зони спікання [39].

Час перебування матеріалу в печі визначається залежністю:

$$\tau = \frac{1{,}77 \cdot L \cdot \sqrt{\phi}}{n \cdot D \cdot \sin\beta}, \quad (1.13)$$

де τ — час перебування матеріалу в печі, хв; L — довжина печі, м; φ — коефіцієнт заповнення печі (зазвичай 0,07–0,12); n — швидкість обертання печі, об/хв; D — внутрішній діаметр печі, м; β — кут нахилу печі, град.

Колосниковий холодильник охолоджує клінкер від 1400°C до 80–120°C; підігріте вторинне та третинне повітря використовується для горіння палива, що забезпечує рекуперацію 65–75% тепла клінкеру [40].

Ефективність рекуперації тепла в холодильнику визначається формулою:

$$\eta_{rec} = \frac{Q_{sec} + Q_{tert}}{Q_{clinker}^{in}} \times 100\%, \quad (1.14)$$

де η_{rec} — ефективність рекуперації тепла, %; Q_{sec} — теплота, передана вторинному повітрю, кВт; Q_{tert} — теплота, передана третинному повітрю, кВт; $Q_{clinker}^{\{in\}}$ — теплота клінкеру на вході в холодильник, кВт.

Енергетичний баланс пічної системи

Загальний тепловий баланс комбінованої пічної системи описується рівнянням:

$$Q_{fuel,total} = Q_{useful} + Q_{loss,total}, \quad (1.15)$$

де $Q_{fuel,total}$ — загальна теплота згоряння палива, кВт; Q_{useful} — корисно використана теплота (на фізико-хімічні перетворення), кВт; $Q_{loss,total}$ — сумарні теплові втрати, кВт.

Корисна теплота складається з кількох компонентів:

$$Q_{useful} = Q_{evap} + Q_{dehyd} + Q_{dec} + Q_{reactions} + Q_{melt}, \quad (1.16)$$

де Q_{evap} — теплота випаровування вологи, кВт; Q_{dehyd} — теплота дегідратації глинистих мінералів, кВт; Q_{dec} — теплота декарбонізації, кВт; $Q_{reactions}$ — теплота утворення клінкерних мінералів, кВт; Q_{melt} — теплота плавлення рідкої фази, кВт.

Теоретична питома витрата тепла на випал клінкеру, розрахована за тепловим ефектом реакцій, становить приблизно 1,7–1,8 ГДж/т [41]. Фактична витрата значно вища через неминучі теплові втрати.

Сумарні теплові втрати включають:

$$Q_{loss,total} = Q_{gas} + Q_{clinker} + Q_{dust} + Q_{rad} + Q_{conv}, \quad (1.17)$$

де Q_{gas} — втрати з відхідними газами, кВт; $Q_{clinker}$ — втрати з гарячим клінкером, кВт; Q_{dust} — втрати з винесеним пилом, кВт; Q_{rad} — радіаційні втрати з поверхні обладнання, кВт; Q_{conv} — конвективні втрати з поверхні обладнання, кВт.

Найбільшою статтею втрат є втрати з відхідними газами (20–35% загального теплоспоживання); їх температура в сучасних системах з 5–6 ступенями циклонів становить 280–350°C [42].

Питома витрата тепла на випал клінкеру визначається формулою:

$$q = \frac{Q_{fuel,total}}{G_{clinker}} = \frac{B \cdot Q_i^r}{G_{clinker}}, \quad (1.18)$$

де q — питома витрата тепла, кДж/кг клінкеру; $Q_{fuel,total}$ — загальна теплова потужність, кВт; $G_{clinker}$ — продуктивність печі по клінкеру, кг/с; B — витрата палива, кг/с; Q_i^r — нижча теплота згоряння палива на робочу масу, кДж/кг.

Для сучасних пічних систем з декарбонізатором типові значення питомої витрати тепла становлять 3000–3400 кДж/кг клінкеру, тоді як для старих печей мокрого способу — 5000–6000 кДж/кг [43].

Електроспоживання пічної системи

Окрім теплової енергії, пічна система споживає 20–30 кВт·год/т клінкеру електроенергії [44]: привід обертання печі — 3–5, димосос сировинного млина — 4–6, вентилятор холодильника — 3–5, димосос печі — 2–4, інше обладнання — 5–10 кВт·год/т клінкеру.

Показники енергоефективності цементного виробництва

Для оцінки енергоефективності цементного виробництва використовують комплекс показників [45]. Загальне питоме енергоспоживання на виробництво цементу визначається як:

$$SEC_{cement} = \frac{q \cdot k_{clinker}}{1000} + SEC_{el,total} \cdot k_{el}, \quad (1.19)$$

де SEC_{cement} — загальне питоме енергоспоживання, ГДж/т цементу; q — питома витрата тепла на випал клінкеру, кДж/кг; $k_{clinker}$ — клінкерний фактор (частка клінкеру в цементі), зазвичай 0,65–0,95; $SEC_{el,total}$ — загальне питоме електроспоживання, кВт·год/т цементу; k_{el} — коефіцієнт переведення електроенергії в первинну енергію (≈2,5 для теплових електростанцій).

Клінкерний фактор є важливим показником ефективності, оскільки заміщення клінкеру мінеральними добавками (шлак, зола, пуцолани) знижує і енергоспоживання, і викиди CO_2:

$$k_{clinker} = \frac{m_{clinker}}{m_{cement}}, \quad (1.20)$$

де $k_{clinker}$ — клінкерний фактор; $m_{clinker}$ — маса клінкеру в цементі, т; m_{cement} — маса виробленого цементу, т.

Стан цементної промисловості України

Цементна промисловість України представлена кількома великими підприємствами загальною потужністю близько 20 млн т цементу на рік [46]; більшість використовує сухий спосіб виробництва, проте значна частина обладнання потребує модернізації.

Середня питома витрата тепла на українських заводах становить 3400–4000 кДж/кг клінкеру — на 15–25% вище за найкращі світові показники [47], що свідчить про значний потенціал енергозбереження.

Використання альтернативних палив в Україні не перевищує 5% загального енергоспоживання проти 40–80% у країнах ЄС [48]; збільшення їх частки є пріоритетним напрямом розвитку галузі та потребує вдосконалення технологій спалювання і систем автоматизованого управління.

Отже, комбінована пічна система з декарбонізатором є складним об'єктом управління з множиною взаємопов'язаних параметрів; особливої актуальності набуває розробка систем управління, здатних забезпечити стабільну роботу печі при використанні альтернативних палив зі змінними характеристиками.

1.3 Альтернативні палива в цементній промисловості

Альтернативні палива поширилися як відповідь на зростання цін на енергоносії та екологічні вимоги. Цементна піч придатна для утилізації горючих відходів завдяки високим температурам (до 2000°C у факелі), тривалому перебуванню газів (понад 5 с при 1200°C), лужному середовищу та включенню мінерального залишку до клінкеру [49].

Класифікація альтернативних палив

Альтернативні палива для цементної промисловості класифікують за кількома ознаками. За походженням виділяють такі основні групи [50]:

Тверде відновлюване паливо (SRF — Solid Recovered Fuel) отримують механічною обробкою твердих побутових і промислових відходів; завдяки контрольованій підготовці воно має відносно стабільні властивості: калорійність 15–25 МДж/кг, вологість 10–25%, зольність 10–20% [51].

Паливо з відходів (RDF — Refuse Derived Fuel) — менш підготовлена фракція з ширшим діапазоном характеристик; калорійність становить 10–20 МДж/кг [52].

Біомаса та біопаливо (деревні відходи, сільськогосподарські залишки, відпрацьовані олії та жири) характеризуються нейтральним вуглецевим балансом [53].

Відпрацьовані шини мають калорійність 30–35 МДж/кг, що перевищує вугілля; залізо металевого корду частково компенсує потребу в залізовмісних добавках [54].

Відпрацьовані оливи та розчинники (35–45 МДж/кг) використовуються переважно в основному пальнику завдяки швидкому та повному згорянню [55].

Полімервмісні промислові відходи (пластмаси, кабельна продукція, текстиль) мають калорійність 15–40 МДж/кг залежно від типу полімеру та вмісту наповнювачів [56].

За агрегатним станом альтернативні палива поділяють на тверді, рідкі та пастоподібні; за способом подачі — для основного пальника печі, пальника декарбонізатора та вхідної камери печі [57].

Характеристики альтернативних палив

Придатність альтернативного палива для використання в цементній печі визначається комплексом фізико-хімічних характеристик. Основними параметрами є [58]:

Нижча теплота згоряння характеризує енергетичну цінність палива та визначається за формулою:

$$Q_i^r = Q_s^r - 2{,}5 \cdot (9H^r + W^r), \quad (1.21)$$

де Q_i^r — нижча теплота згоряння на робочу масу, МДж/кг; Q_s^r — вища теплота згоряння на робочу масу, МДж/кг; H^r — вміст водню на робочу масу, %; W^r — вологість палива на робочу масу, %; *2,5* — коефіцієнт, що враховує теплоту пароутворення, МДж/кг.

Вологість безпосередньо впливає на ефективну калорійність і стабільність горіння: підвищена вологість спричиняє додаткові витрати тепла на випаровування та нестабільність температурного режиму; допустимою зазвичай є вологість 20–25% [59].

Зольність визначає кількість мінерального залишку, що утворюється при спалюванні. У цементному виробництві зола палива включається до складу клінкеру, тому її хімічний склад має бути сумісним із сировинною сумішшю:

$$A^r_{compatible} = f(CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3), \quad (1.22)$$

де *A^r_compatible* — сумісна зольність, %; *CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3* — вміст основних оксидів у золі, %.

Вміст хлору є критичним параметром, оскільки хлор спричиняє утворення настилів у циклонному теплообміннику та прискорену корозію обладнання; гранично допустимий вміст зазвичай обмежується 0,5–1,5% у перерахунку на клінкер [60].

Вміст важких металів регламентується екологічними нормативами: більшість зв'язується у клінкерній матриці, проте леткі метали (ртуть, талій) можуть виноситися з відхідними газами і потребують контролю [61].

Гранулометричний склад впливає на повноту і швидкість згоряння: оптимальний розмір частинок становить 10–30 мм для декарбонізатора та менше 5 мм для основного пальника [62].

Особливості спалювання альтернативних палив

Процес горіння альтернативних палив суттєво відрізняється від горіння традиційних палив через неоднорідність складу та властивостей. Час повного згоряння частинки альтернативного палива можна оцінити за формулою:

$$\tau_{burn} = \tau_{heat} + \tau_{devol} + \tau_{char}, \quad (1.23)$$

де τ_{burn} — загальний час згоряння частинки, с; τ_{heat} — час нагрівання до температури займання, с; τ_{devol} — час виходу та горіння летких речовин, с; τ_{char} — час вигоряння коксового залишку, с.

Для полімерних матеріалів етап виходу летких може становити 60–80% загального часу горіння, що вимагає достатнього часу перебування частинок у зоні високих температур [63].

Швидкість вигоряння частинки альтернативного палива описується рівнянням:

$$\frac{dm}{dt} = -k \cdot A_p \cdot C_{O_2}^n, \text{ (1.24)}$$

де *dm/dt* — швидкість втрати маси частинки, кг/с; k — константа швидкості реакції, що залежить від температури за законом Арреніуса; A_p — площа поверхні частинки, м²; *C_{O_2}* — концентрація кисню в газовому середовищі, кг/м³; n — порядок реакції за киснем (зазвичай n = 0,5–1,0).

Константа швидкості реакції визначається рівнянням Арреніуса:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right), \text{ (1.25)}$$

де k_0 — передекспоненціальний множник, 1/с; E_a — енергія активації, Дж/моль; R — універсальна газова стала (8,314 Дж/(моль·К)); T — абсолютна температура, К.

Вплив альтернативних палив на технологічний процес

Заміщення традиційного палива альтернативним впливає на багато аспектів роботи пічної системи [64]:

Тепловий баланс печі змінюється внаслідок відмінностей у калорійності, вологості та зольності альтернативного палива. Коефіцієнт заміщення палива розраховується за формулою:

$$TSR = \frac{Q_{AF}}{Q_{total}} \times 100\%, \text{ (1.26)}$$

де TSR — коефіцієнт термічного заміщення (Thermal Substitution Rate), %; Q_{AF} — теплота, внесена альтернативним паливом, МВт; Q_{total} — загальне теплоспоживання печі, МВт.

Аеродинаміка факела може порушуватися при спалюванні крупних частинок або значній частці альтернативного палива в основному пальнику, що спричиняє нерівномірність температур у зоні спікання та погіршення якості клінкеру [65].

Хімічний склад клінкеру може змінюватися через надходження золи альтернативного палива; для контролю використовують коригування сировинної суміші та обмеження частки палива залежно від складу його золи [66].

Викиди забруднюючих речовин потребують особливої уваги, проте при дотриманні технологічних вимог вони залишаються в межах нормативів і можуть бути навіть нижчими, ніж при спалюванні вугілля, завдяки меншому утворенню термічних NOx [67].

Світовий досвід використання альтернативних палив

Рівень заміщення суттєво відрізняється між країнами; лідерами є країни Західної Європи: Німеччина — 65–70% TSR, Австрія — 75–80%, Нідерланди — 85–90%, Швейцарія — 55–60%, Польща — 65–70% [68].

Середній показник по ЄС становить близько 50%, у глобальному масштабі — 18% [69]; в Україні рівень заміщення менший за 5%, що пояснюється нерозвиненістю інфраструктури збирання й підготовки палив та регуляторними бар'єрами [70].

$$E_{AF} = (C_{TF} - C_{AF}) \cdot B_{AF} - C_{inv} - C_{op}, \quad (1.27)$$

Альтернативне паливо часто має негативну або нульову вартість, оскільки завод отримує плату за утилізацію відходів (gate fee), що створює подвійну економічну вигоду — економію на паливі та додатковий дохід [71].

Проблеми використання альтернативних палив зі змінними характеристиками

Головною технологічною проблемою є нестабільність характеристик: на відміну від традиційних палив, властивості яких змінюються повільно та прогнозовано, альтернативні палива характеризуються значною варіативністю параметрів [72].

Коефіцієнт варіації калорійності альтернативного палива може становити:

$$CV_Q = \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}} \times 100\%, \quad (1.28)$$

де CV_Q — коефіцієнт варіації калорійності, %; σ_Q — середньоквадратичне відхилення калорійності, МДж/кг; $\bar{Q}$ — середнє значення калорійності, МДж/кг.

Для SRF типовий коефіцієнт варіації становить 10–20%, для RDF — 20–35%, для несортованих відходів — 30–50% [73], що створює значні труднощі для традиційних систем управління, налаштованих на стабільні параметри палива.

Нестабільність характеристик палива спричиняє коливання температури зони спікання, нестабільність ступеня декарбонізації, недопал або перепал клінкеру, перевитрату традиційного палива, знос футеровки та зростання викидів [74].

Компенсація цієї нестабільності потребує систем управління, здатних оперативно коригувати параметри технологічного режиму. Завдання ускладнюється неможливістю оперативного вимірювання калорійності палива: результати лабораторного аналізу доступні лише через кілька годин після відбору проби [75].

Отже, альтернативні палива є перспективним напрямом підвищення енергоефективності та екологічності цементного виробництва, проте потребують спеціалізованих систем автоматичного управління, здатних адаптуватися до змінних характеристик палива в реальному часі.

1.4 Полімервмісні відходи військового походження як потенційне паливо

Повномасштабна збройна агресія російської федерації проти України породила нову екологічну проблему — накопичення специфічних відходів військового походження, серед яких особливе місце посідає оптоволоконний кабель керування FPV-дронами [76].

Масштаби накопичення оптоволоконного кабелю

Керування FPV-дронами оптоволоконним кабелем поширилося з 2023 року: технологія стійка до радіоелектронного придушення та забезпечує високу якість відеосигналу, проте залишає після кожного застосування сотні метрів кабелю на місцевості [77].

Щоденне застосування FPV-дронів на фронті вимірюється тисячами одиниць з обох сторін; за середньої довжини кабелю 500–1500 м обсяги щоденного накопичення можна оцінити так:

$$V_{daily} = N_{FPV} \cdot L_{avg}, \quad (1.29)$$

де V_{daily} — щоденний обсяг накопичення кабелю, км; N_{FPV} — кількість застосованих FPV-дронів з кабельним керуванням, од./добу; L_{avg} — середня довжина кабелю на один дрон, км.

За консервативними оцінками (2000–5000 кабельних дронів на добу, середня довжина кабелю 0,8 км) щоденне накопичення становить 1600–4000 км, а загальний обсяг за період 2023–2025 рр. може сягати 50000–150000 км [78].

Географічно кабель зосереджений у прифронтових районах Донецької, Луганської, Запорізької, Херсонської та Харківської областей; після деокупації постане завдання очищення цих територій, включно зі збиранням кабелю [79].

Конструкція та склад оптоволоконного кабелю

Оптоволоконний кабель для керування FPV-дронами має специфічну конструкцію, оптимізовану для легкості, гнучкості та механічної міцності. Типова структура такого кабелю включає кілька шарів [80]:

Оптичне волокно — центральний елемент кабелю, тонка нитка з кварцового скла (SiO_2) діаметром 125–250 мкм; масова частка скловолокна в кабелі становить 20–35%.

Захисне покриття волокна з акрилатних або силіконових полімерів товщиною 50–100 мкм захищає крихке скловолокно від мікровигинів і механічних пошкоджень.

Силовий елемент з арамідних волокон (кевлар, тварон) забезпечує міцність кабелю на розтяг; арамід поєднує високу міцність (3–4 ГПа) з низькою густиною (1,44 г/см³) [81].

Зовнішня оболонка з поліетилену (PE), поліаміду (PA) або полівінілхлориду (PVC) товщиною 0,3–0,8 мм захищає внутрішні елементи від вологи, ультрафіолету та механічних впливів.

Масовий склад типового оптоволоконного кабелю для FPV-дронів можна представити наступним співвідношенням компонентів:

$$m_{cable} = m_{glass} + m_{polymer} + m_{aramid} + m_{other}, \quad (1.30)$$

де m_{cable} — загальна маса кабелю, кг; m_{glass} — маса скловолокна, кг (20–35% від загальної маси); $m_{polymer}$ — маса полімерних компонентів (оболонка, покриття), кг (40–55%); m_{aramid} — маса арамідних волокон, кг (15–25%); m_{other} — маса інших компонентів (барвники, стабілізатори), кг (2–5%).

Лінійна маса кабелю для FPV-застосувань зазвичай становить 1,5–4,0 г/м залежно від конструкції та кількості оптичних волокон [82].

Енергетичні характеристики компонентів кабелю

Полімерні та арамідні компоненти оптоволоконного кабелю є горючими матеріалами з відносно високою теплотою згоряння. Енергетичні характеристики основних компонентів наведено нижче [83]:

Поліетилен має найвищу калорійність серед поширених полімерів: 43–46 МДж/кг при зольності менше 0,1%; полівінілхлорид через вміст хлору (56,8%) — лише 18–22 МДж/кг; поліамід — 30–32 МДж/кг; арамідні волокна — 28–32 МДж/кг при температурі розкладу 450–550°C.

Скловолокно є негорючим компонентом (SiO_2) і не вносить вкладу в теплоту згоряння, проте після спалювання переходить у золу палива.

Теоретична калорійність оптоволоконного кабелю як композитного палива розраховується за адитивною формулою:

$$Q_i^{cable} = \sum_{j=1}^{n} w_j \cdot Q_i^j, \quad (1.31)$$

де $Q_i^{\{cable\}}$ — нижча теплота згоряння кабелю, МДж/кг; w_j — масова частка j-го горючого компонента; Q_i^j — нижча теплота згоряння j-го компонента, МДж/кг; n — кількість горючих компонентів.

Для типового оптоволоконного кабелю з поліетиленовою оболонкою розрахункова калорійність становить:

$$Q_i^{cable} = 0{,}50 \cdot 44 + 0{,}20 \cdot 30 + 0 \cdot 0 = 22 + 6 = 28 \text{ МДж/кг}$$

де прийнято: 50% — поліетилен (44 МДж/кг), 20% — арамід (30 МДж/кг), 30% — скловолокно (0 МДж/кг).

Для кабелю з PVC-оболонкою калорійність буде нижчою через менший енергетичний вклад хлорвмісного полімеру — орієнтовно 18–22 МДж/кг [84].

Особливості підготовки кабелю до використання як палива

Використання оптоволоконного кабелю як альтернативного палива потребує попередньої підготовки, що включає кілька етапів [85]:

Збирання та сортування передбачає механізоване або ручне збирання кабелю з відокремленням від металевих уламків і вибухонебезпечних предметів; орієнтовна продуктивність становить 50–200 кг кабелю на людино-день.

Вхідний контроль включає візуальний огляд і базове тестування для виявлення небезпечних домішок; кабель, що не пройшов контроль, направляється на спеціалізовану утилізацію.

Подрібнення визначає характеристики готового палива: оптимальний розмір частинок — 10–30 мм для декарбонізатора і менше 5 мм для основного пальника; використовуються роторні або ножові дробарки продуктивністю 1–5 т/год [86].

Ступінь подрібнення характеризується коефіцієнтом:

$$i = \frac{D_{input}}{D_{output}}, \quad (1.32)$$

де i — ступінь подрібнення; D_{input} — характерний розмір вхідного матеріалу, мм; D_{output} — характерний розмір вихідного продукту, мм.

Для підготовки кабелю типовий ступінь подрібнення становить 50–200.

Сушіння потрібне, якщо вологість зібраного кабелю перевищує допустимі 20–25%; його здійснюють у барабанних або стрічкових сушарках до залишкової вологості 10–15%.

Гомогенізація — змішування партій кабелю різного походження для зменшення варіативності характеристик готового палива; її ефективність оцінюється зниженням коефіцієнта варіації калорійності:

$$CV_{homog} = \frac{CV_{input}}{\sqrt{n_{mix}}}, \quad (1.33)$$

де CV_{homog} — коефіцієнт варіації після гомогенізації, %; CV_{input} — вхідний коефіцієнт варіації, %; n_{mix} — кількість змішаних партій.

Специфічні характеристики кабелю як альтернативного палива

Оптоволоконний кабель як альтернативне паливо має низку специфічних особливостей, що відрізняють його від інших видів альтернативних палив [87]:

Відносно стабільна калорійність порівняно з несортованим RDF пояснюється обмеженим набором компонентів і стандартизованою конструкцією кабелю; очікуваний коефіцієнт варіації становить 10–20%, що відповідає рівню якісного SRF.

Низька вологість у вихідному стані (зазвичай менше 5%) є перевагою, проте при тривалому зберіганні в несприятливих умовах вона може зростати до 15–30%.

Висока зольність (25–40%) зумовлена значним вмістом скловолокна; хімічний склад золи (переважно SiO_2) сумісний із цементною сировиною.

Зольність кабелю визначається вмістом негорючих компонентів:

$$A^r = w_{glass} + w_{filler} + w_{ash,polymer}, \quad (1.34)$$

де A^r — зольність на робочу масу, %; w_{glass} — масова частка скловолокна, %; w_{filler} — масова частка мінеральних наповнювачів, %; $w_{ash,polymer}$ — зольність полімерних компонентів, %.

Вміст хлору залежить від типу полімерної оболонки: для PE-кабелів він мінімальний (менше 0,1%), для PVC-кабелів — високий; змішування різних типів кабелю дозволяє регулювати середній вміст хлору в паливі.

Гранично допустима частка кабелю з PVC-оболонкою в паливній суміші визначається з умови дотримання ліміту хлору в клінкері:

$$w_{PVC,max} = \frac{Cl_{limit} \cdot G_{clinker}}{Cl_{PVC} \cdot B_{cable}}, \quad (1.35)$$

де $w_{PVC,max}$ — максимальна частка кабелю з PVC-оболонкою; Cl_{limit} — гранично допустимий вміст хлору в клінкері, кг/кг; $G_{clinker}$ — продуктивність печі по клінкеру, кг/с; Cl_{PVC} — вміст хлору в PVC-кабелі, кг/кг; B_{cable} — витрата кабелю як палива, кг/с.

Вміст азоту підвищений через арамідні волокна та поліамід, що може збільшувати викиди паливних NOx, проте високотемпературні умови цементної печі забезпечують ефективне руйнування NOx у зоні відновлення [88].

Логістика та економіка використання кабелю

Використання оптоволоконного кабелю як альтернативного палива потребує логістичної системи, що охоплює збирання, транспортування, підготовку та зберігання [89].

Вартість підготовленого палива з оптоволоконного кабелю можна оцінити за формулою:

$$C_{cable} = C_{collect} + C_{transport} + C_{process} + C_{storage}, \quad (1.36)$$

де C_{cable} — собівартість палива, грн/т; $C_{collect}$ — витрати на збирання (включаючи оплату праці, розмінування), грн/т; $C_{transport}$ — транспортні витрати, грн/т; $C_{process}$ — витрати на підготовку (подрібнення, сушіння), грн/т; $C_{storage}$ — витрати на зберігання, грн/т.

1.5 Сучасні системи автоматизації цементних печей

Газоаналізатори вимірюють концентрації O_2, CO, NOx, SO_2 у відхідних газах; вміст кисню є ключовим параметром оптимізації горіння і визначається коефіцієнтом надлишку повітря:

$$\alpha = \frac{O_2^{measured}}{21 - O_2^{measured}} \cdot \frac{21}{O_2^{stoich}} + 1, \quad (1.39)$$

де α — коефіцієнт надлишку повітря; *O₂^measured* — виміряний вміст кисню у відхідних газах, %; *O₂^stoich* — стехіометрична потреба в кисні для палива, %.

Якість клінкеру контролюють рентгенофлуоресцентні аналізатори (XRF) та аналізатори вільного вапна (f-CaO), вміст якого є інтегральним показником повноти випалу:

$$f - CaO = f(T_{zone}, \tau, SR, AR, LSF), \quad (1.40)$$

де *f-CaO* — вміст вільного вапна, %; T_{zone} — температура зони спікання, °C; τ — час перебування матеріалу в зоні спікання, хв; *SR, AR, LSF* — модулі сировинної суміші (силікатний, глиноземний, коефіцієнт насичення вапном).

Типові контури регулювання пічної системи

Базова автоматизація пічної системи включає кілька десятків контурів регулювання, що забезпечують підтримання заданих параметрів технологічного режиму. Найважливішими контурами є [90]:

Контур регулювання температури зони спікання є центральним: температура оцінюється за показаннями пірометра або температурою корпусу печі, керуючим впливом є витрата палива основного пальника. Типовий ПІД-регулятор описується передатною функцією:

$$W_{PID}(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s\right), \quad (1.41)$$

де *W_PID(s)* — передатна функція регулятора; K_p — коефіцієнт пропорційності; T_i — постійна часу інтегрування, с; T_d — постійна часу диференціювання, с; s — оператор Лапласа.

Складність регулювання зумовлена значним транспортним запізненням (5–15 хв), великою інерційністю (постійна часу 20–60 хв) та впливом численних збурень [91].

Контур регулювання розрідження в печі підтримує стабільний аеродинамічний режим через управління продуктивністю димососа; задане розрідження на вході в піч становить -50...-150 Па.

Контур регулювання вмісту кисню у відхідних газах забезпечує оптимальні умови горіння (1,5–3,0% O_2 для основного пальника) через витрату первинного повітря.

Контур температури в декарбонізаторі підтримує 850–900°C, необхідні для повної декарбонізації сировини, через витрату палива пальника декарбонізатора.

Контур ступеня декарбонізації є каскадним до контуру температури; ступінь оцінюється за аналізом матеріалу на вході в піч або розраховується за моделлю.

Контур швидкості обертання печі підтримує заданий час перебування матеріалу та рівномірне завантаження зони спікання.

Системи поглибленого управління процесами (APC)

Традиційні ПІД-регулятори не забезпечують оптимального управління цементною піччю через складність об'єкта та численні обмеження; системи поглибленого управління процесами (APC) підвищують ефективність завдяки багатовимірному управлінню та оптимізації [92].

Прогнозуюче управління на основі моделі (MPC — Model Predictive Control) є найбільш поширеним методом APC для цементних печей. Алгоритм MPC розв'язує на кожному кроці оптимізаційну задачу:

$$\min_{u(k)\dots u(k+N_u-1)} J = \sum_{i=1}^{N_p} \| y(k+i) - r(k+i) \|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_u-1} \| \Delta u(k+i) \|_R^2, \quad (1.42)$$

де J — критерій оптимальності; $y(k+i)$ — прогнозований вихід системи на крок k+i; $r(k+i)$ — задане значення виходу; $\Delta u(k+i)$ — приріст керуючого впливу; N_p — горизонт прогнозування; N_u — горизонт управління; Q, R — вагові матриці.

При цьому враховуються обмеження на керуючі впливи, швидкості їх зміни та вихідні змінні:

$$u_{min} \le u(k+i) \le u_{max}, \quad (1.43)$$

$$\Delta u_{min} \le \Delta u(k+i) \le \Delta u_{max}, \quad (1.44)$$

$$y_{min} \le y(k+i) \le y_{max}. \quad (1.45)$$

Перевагами МРС є врахування обмежень, багатовимірності процесу та запізнень, а також можливість включення економічних критеріїв до функції мети [93].

1.6 Аналіз досліджень та виявлення прогалин

Альтернативні палива досліджуються переважно з технологічної та екологічної точок зору: роботи [94, 95] присвячені впливу на якість клінкеру та викиди, дослідження [96] — спалюванню RDF у декарбонізаторі; питання автоматизації управління залишаються недостатньо висвітленими.

Аналіз підходів до управління при змінних характеристиках палива

Проблема управління тепловими процесами при варіативності характеристик палива досліджувалася для різних промислових об'єктів; існуючі підходи можна звести до кількох стратегій:

Робастне управління передбачає синтез регуляторів, що зберігають якість у широкому діапазоні параметрів об'єкта; автори [97] застосували H∞-оптимальне управління для котельних установок на паливі змінної якості. Коефіцієнт робастності визначається як:

$$K_{robust} = \frac{\Delta P_{max}}{P_{nom}}, \quad (1.48)$$

де K_{robust} — коефіцієнт робастності; ΔP_{max} — максимальне відхилення параметрів об'єкта, при якому зберігається стійкість та якість управління; P_{nom} — номінальне значення параметра.

Недоліком робастного підходу є консервативність: налаштування на найгірший випадок призводить до втрати ефективності за нормальних умов.

Адаптивне управління передбачає автоматичне підлаштування параметрів регулятора до змін характеристик об'єкта; у роботі [98] запропоновано адаптивний ПІД-регулятор з ідентифікацією параметрів об'єкта в реальному часі методом рекурсивних найменших квадратів:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k) \cdot [y(k) - \varphi^T(k) \cdot \hat{\theta}(k-1)], \quad (1.49)$$

$$K(k) = \frac{P(k-1)\cdot\varphi(k)}{\lambda+\varphi^T(k)\cdot P(k-1)\cdot\varphi(k)}, (1.50)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda}\cdot[P(k-1) - K(k)\cdot\varphi^T(k)\cdot P(k-1)], (1.51)$$

де $\theta(k)$ — оцінка вектора параметрів на кроці k; *K(k)* — вектор коефіцієнтів підсилення; *y(k)* — виміряний вихід; $\varphi(k)$ — вектор регресорів; *P(k)* — коваріаційна матриця; λ — фактор забування (0,95–0,99).

Обмеженням адаптивного управління є потреба в достатній інформативності сигналів для коректної ідентифікації, що не завжди забезпечується за нормальної експлуатації.

Управління з випереджувальною компенсацією збурень (feedforward) передбачає вимірювання збурення та формування компенсуючого впливу до того, як збурення вплине на вихід системи; для змінної калорійності палива закон управління має вигляд:

$$u(t) = u_{fb}(t) + K_{ff}\cdot\Delta Q_i(t), (1.52)$$

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено комплексний аналіз стану проблеми автоматизації енергоємних технологічних процесів із фокусом на цементному виробництві та використанні альтернативних палив. Основні висновки:

1. Енергоємні процеси споживають до 70% енергоресурсів промислового сектору; цементне виробництво є одним із найбільш енергоємних із питомою витратою тепла 3000–4200 кДж/кг клінкеру. Потенціал енергозбереження української цементної промисловості становить 15–25%, що обумовлює актуальність досліджень.

2. Комбінована пічна система (теплообмінник, декарбонізатор, обертова піч, холодильник) є складним багатовимірним об'єктом управління з

температурою до 1450°C, запізненнями 10–30 хв, інерційністю (20–60 хв) та взаємозв'язком контурів; найбільші втрати — з відхідними газами (20–35%).

3. Альтернативні палива — перспективний напрям підвищення енергоефективності: світовий досвід демонструє термічне заміщення 70–90%, в Україні — до 5%. Основна проблема — нестабільність характеристик палива (CV калорійності 10–50%).

4. Оптоволоконний кабель від FPV-дронів — потенційне альтернативне паливо: накопичення 50–150 тис. км, калорійність 18–28 МДж/кг, підвищена зольність (25–40%) і варіативний вміст хлору. Його використання вирішує проблему утилізації військових відходів і знижує енергетичні витрати.

5. Сучасні системи автоматизації печей (ПЛК, SCADA, APC; рішення ABB, FLSmidth, Siemens) знижують питому витрату тепла на 2–6% на традиційному паливі, проте не вирішують проблему змінних характеристик альтернативних палив через відсутність оперативного вимірювання калорійності.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСООБМІНУ В КОМБІНОВАНІЙ ПІЧНІЙ СИСТЕМІ

2.1 Структурна декомпозиція об'єкта управління

Декомпозиція на підсистеми

Для спрощення задачі моделювання та управління комбіновану пічну систему доцільно розбити на кілька взаємопов'язаних підсистем [99]:

Підсистема горіння описує процеси згоряння традиційного та альтернативного палива в пальниках печі та декарбонізатора. Входами підсистеми є витрати палива та повітря, виходами — тепловий потік та склад продуктів згоряння.

Підсистема теплообміну в печі описує передачу тепла від газів до матеріалу, теплопровідність у шарі та футеровці, радіаційний теплообмін; входами є тепловий потік від горіння, виходами — температурний профіль по довжині печі.

Підсистема хімічних реакцій описує кінетику декарбонізації та утворення клінкерних мінералів. Входами є температура та склад матеріалу, виходами — ступінь перетворення та фазовий склад.

Підсистема руху матеріалу описує транспортування сировини та клінкеру через піч. Входами є швидкість обертання печі та витрата сировини, виходами — час перебування та заповнення печі.

Підсистема газової динаміки описує рух газів через піч, декарбонізатор та циклонний теплообмінник. Входами є витрати газів та аеродинамічний опір, виходами — тиск та швидкість газів у різних точках системи.

Підсистема холодильника описує охолодження клінкеру та підігрів повітря. Входами є температура клінкеру та витрата повітря, виходами — температура охолодженого клінкеру та підігрітого повітря.

Взаємозв'язок між підсистемами формалізується через граничні умови та потоки енергії й матеріалів. Матриця зв'язків між підсистемами має вигляд:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & c_{12} & 0 & 0 & c_{15} & 0 \\ c_{21} & 0 & c_{23} & c_{24} & 0 & 0 \\ 0 & c_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{65} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

де c_{ij} — коефіцієнт зв'язку від підсистеми j до підсистеми i (ненульове значення означає наявність впливу).

Часові масштаби процесів

Різні процеси в пічній системі характеризуються суттєво відмінними часовими масштабами, що важливо враховувати при побудові моделей та систем управління [100]:

Швидкі процеси (характерний час 0,1–10 с): горіння палива, газодинамічні процеси, регулювання витрат.

Середні процеси (характерний час 1–30 хв): теплообмін газ-матеріал, нагрівання футеровки, транспортування матеріалу через декарбонізатор.

- U7 — витрата сировини.

Структурна декомпозиція об'єкта управління є основою для розробки математичних моделей окремих підсистем, що розглядаються в наступних підрозділах.

2.2 Математична модель теплообміну в обертовій печі

Обертова піч — центральний елемент комбінованої пічної системи, де відбуваються завершальні стадії термічної обробки сировини. Моделювання теплообміну в ній ускладнене поєднанням різних механізмів теплопередачі, хімічними реакціями та рухом матеріалу; розроблена модель має забезпечити

достатню для цілей управління точність при прийнятних обчислювальних витратах [101].

Геометрія та координатна система

Обертова піч являє собою циліндричний реактор довжиною L = 50–80 м та внутрішнім діаметром D = 4–6 м, встановлений під кутом β = 2,5–4° до горизонту. Для опису процесів у печі введемо циліндричну координатну систему з віссю z, направленою вздовж осі печі від холодного кінця (вхід матеріалу) до гарячого кінця (зона спікання) [102].

Поперечний переріз печі характеризується кутом заповнення матеріалом γ, що визначає площу поперечного перерізу шару матеріалу:

$$A_{bed} = \frac{R^2}{2} \cdot (\gamma - \sin\gamma), \quad (2.9)$$

де A_{bed} — площа поперечного перерізу шару матеріалу, м²; R — внутрішній радіус печі, м; γ — кут заповнення (центральний кут, що відповідає хорді поверхні матеріалу), рад.

Коефіцієнт заповнення печі визначається як відношення площі матеріалу до площі перерізу печі:

$$\phi = \frac{A_{bed}}{\pi R^2} = \frac{\gamma - \sin\gamma}{2\pi}. \quad (2.10)$$

Для промислових печей типове значення коефіцієнта заповнення становить ϕ = 0,07–0,12 [103].

Механізми теплообміну в печі

У робочому просторі обертової печі одночасно діють три механізми теплопередачі: випромінювання, конвекція та теплопровідність. Відносний внесок кожного механізму залежить від температурного рівня та зони печі [104].

Радіаційний теплообмін домінує у високотемпературній зоні печі (понад 1000°C) і здійснюється між полум'ям, газами, матеріалом та футеровкою за законом Стефана-Больцмана:

$$q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon_{eff} \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.11)$$

Для системи «газ — поверхня матеріалу» ефективний коефіцієнт випромінювання визначається з урахуванням випромінювальної здатності газів:

$$\varepsilon_{eff,gm} = \frac{\varepsilon_g \cdot \varepsilon_m}{\varepsilon_g + \varepsilon_m - \varepsilon_g \cdot \varepsilon_m}, \quad (2.12)$$

$$R_{th} = \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_{out}}, \quad (2.24)$$

Теплообмін у зоні факела

Зона горіння палива (факел) характеризується інтенсивним тепловиділенням та найвищими температурами в печі. Розподіл тепловиділення вздовж факела апроксимується функцією:

$$Q_{comb}(z) = Q_{total} \cdot f(z), \quad (2.25)$$

Для практичних розрахунків функцію розподілу апроксимують гаусівською кривою:

$$f(z) = \frac{1}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(z - z_f)^2}{2\sigma_f^2}\right), \quad (2.26)$$

де z_f — координата центру факела, м; σ_f — параметр, що характеризує довжину факела, м.

Довжина факела залежить від типу пальника, швидкості витікання паливно-повітряної суміші та характеристик палива. Для альтернативних палив характерна більша довжина факела через нижчу швидкість горіння [105]:

$$L_f = L_{f,ref} \cdot \left(\frac{t_{burn,AF}}{t_{burn,ref}}\right)^{0.5}, \quad (2.27)$$

Складові теплових потоків

Сумарний тепловий потік від газів до матеріалу складається з радіаційної та конвективної складових:

$$q_{gm} = q_{gm,rad} + q_{gm,conv}, \text{(2.28)}$$

Передатна функція каналу «витрата палива — температура зони спікання» з урахуванням транспортного запізнення:

$$W_{BT}(s) = \frac{K_B}{(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)} \cdot e^{-\tau_d s}, \text{(2.42)}$$

Розроблена модель є основою для аналізу динамічних властивостей об'єкта та синтезу регуляторів: повна розподілена модель використовується для детальних досліджень і валідації, спрощена зосереджена — для синтезу та налаштування системи управління в реальному часі.

2.3 Модель процесу декарбонізації

Декарбонізація — термічний розклад карбонату кальцію з виділенням CO_2 — є найбільш енергоємною стадією випалу, що споживає близько 60% загальної теплоти процесу. У сучасних системах 85–95% реакції відбувається в кальцинаторі до надходження матеріалу в піч, що інтенсифікує процес та підвищує енергоефективність [106].

Термодинаміка реакції декарбонізації

Реакція термічного розкладу карбонату кальцію описується рівнянням:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2, \text{(2.43)}$$

Стандартна ентальпія реакції при температурі 25°C становить ΔH^0_{298} = 178 кДж/моль, що відповідає питомій теплоті розкладу:

$$q_{dec} = \frac{\Delta H^0_{298}}{M_{CaCO_3}} = \frac{178}{0{,}1001} = 1779 \text{ кДж/кг } CaCO_3, \text{(2.44)}$$

Температурна залежність ентальпії реакції описується рівнянням Кірхгофа:

$$\Delta H_T = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^{T} \Delta\, c_p\, dT, \text{ (2.45)}$$

$$\ln p_{CO_2}^{eq} = -\frac{\Delta H_T}{R \cdot T} + \frac{\Delta S_T}{R}, \text{ (2.46)}$$

Для практичних розрахунків рівноважний тиск апроксимують емпіричною залежністю:

де τ_{res} — час перебування матеріалу в декарбонізаторі, с.

Для досягнення цільового ступеня декарбонізації 90% при парціальному тиску CO_2 = 25% необхідна температура 870–900°C та час перебування 4–6 с [107].

Вплив альтернативного палива на процес декарбонізації

Спалювання альтернативного палива в декарбонізаторі впливає на процес декарбонізації через кілька механізмів:

Зміна теплового навантаження внаслідок варіативності калорійності палива призводить до коливань температури в декарбонізаторі. Чутливість ступеня декарбонізації до температури:

$$\frac{\partial \alpha_{dec}}{\partial T_{calc}} = \frac{E_{a,dec}}{R \cdot T_{calc}^2} \cdot (1 - \alpha_{dec}) \cdot \ln \frac{1}{1-\alpha_{dec}}, \text{ (2.59)}$$

$$\frac{V_{CO_2}}{Q_i} = \frac{C^r}{12} \cdot \frac{22{,}4}{Q_i^r}, \text{ (2.60)}$$

Нерівномірність горіння великих частинок палива може створювати локальні зони зі сповільненою декарбонізацією, що компенсується ретельним подрібненням палива та рівномірним його розподілом у декарбонізаторі.

Динамічна модель ступеня декарбонізації

Для цілей управління доцільно використовувати спрощену динамічну модель, що описує зв'язок між керуючими впливами та ступенем декарбонізації:

$$\tau_{dec} \frac{d\alpha_{dec}}{dt} = -\alpha_{dec} + \alpha_{dec}^{ss}(T_{calc}, p_{CO_2}, G_{raw}), \text{ (2.61)}$$

Стаціонарне значення визначається за формулою (2.58). Лінеаризація навколо робочої точки дає:

$$\Delta\alpha_{dec} = K_T \cdot \Delta T_{calc} + K_p \cdot \Delta p_{CO_2} + K_G \cdot \Delta G_{raw}, \quad (2.62)$$

Передатна функція каналу «температура декарбонізатора — ступінь декарбонізації»:

$$W_{\alpha T}(s) = \frac{K_T}{\tau_{dec} \cdot s + 1}, \quad (2.63)$$

де K_T — статичний коефіцієнт підсилення (0,8–1,2 %/°C); τ_{dec} — постійна часу (4–8 с).

Каскадний зв'язок з каналом «витрата палива — температура» дає загальну передатну функцію:

$$W_{\alpha B}(s) = W_{\alpha T}(s) \cdot W_{TB}(s) = \frac{K_T \cdot K_{TB}}{(\tau_{dec} \cdot s + 1)(\tau_T \cdot s + 1)} \cdot e^{-\tau_{d,calc} \cdot s}, \quad (2.64)$$

Розроблена модель процесу декарбонізації дозволяє прогнозувати вплив змін теплового навантаження на ступінь декарбонізації та є основою для синтезу системи управління температурним режимом декарбонізатора.

2.4 Модель горіння палива зі змінними характеристиками

Горіння палива визначає температурний режим пічної системи. Для альтернативних палив необхідна модель, що враховує варіативність складу та властивостей палива і дозволяє прогнозувати її вплив на параметри процесу горіння [108].

Характеристики палива та їх варіативність

Паливо для цементної печі характеризується комплексом фізико-хімічних параметрів, що визначають його енергетичну цінність та поведінку при спалюванні. Елементний склад палива на робочу масу включає:

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S^r + A^r + W^r = 100\%, \quad (2.65)$$

Для суміші традиційного та альтернативного палива характеристики визначаються за адитивним принципом:

$$Q_{comb} = B \cdot Q_i^r \cdot \eta_{comb}, \quad (2.84)$$

При постійній витраті палива зміна калорійності призводить до пропорційної зміни теплового потоку:

$$\frac{\Delta Q_{comb}}{Q_{comb}} = \frac{\Delta Q_i^r}{Q_i^r}. \quad (2.85)$$

Для паливної суміші з часткою альтернативного палива ψ та коефіцієнтом термічного заміщення TSR:

$$Q_{comb} = B_{TF} \cdot Q_i^{TF} \cdot \eta_{TF} + B_{AF} \cdot Q_i^{AF} \cdot \eta_{AF}, \quad (2.86)$$

Коефіцієнт термічного заміщення:

$$TSR = \frac{B_{AF} \cdot Q_i^{AF}}{B_{TF} \cdot Q_i^{TF} + B_{AF} \cdot Q_i^{AF}} \times 100\%. \quad (2.87)$$

Варіативність калорійності альтернативного палива створює стохастичне збурення теплового потоку:

$$Q_{comb}(t) = \bar{Q}_{comb} + \Delta Q_{comb}(t), \quad (2.88)$$

Дисперсія відхилення теплового потоку:

$$\sigma^2_{Q_{comb}} = (B_{AF} \cdot \eta_{AF})^2 \cdot \sigma_Q^2, \quad (2.89)$$

Модель впливу на температуру факела

Температура факела (адіабатична температура горіння) визначається з теплового балансу зони горіння:

$$T_{ad} = T_{air} + \frac{Q_i^r \cdot \eta_{comb}}{c_{p,g} \cdot (1 + \alpha \cdot L_0)}, \quad (2.90)$$

Чутливість температури факела до калорійності палива:

$$\frac{\partial T_{ad}}{\partial Q_i^r} = \frac{\eta_{comb}}{c_{p,g} \cdot (1+\alpha \cdot L_0)}. \quad (2.91)$$

Для альтернативного палива з коефіцієнтом варіації калорійності CV_Q = 15% та середньою калорійністю 22 МДж/кг середньоквадратичне відхилення калорійності становить 3,3 МДж/кг, що відповідає варіації температури факела ±230 К [109].

Динамічна модель горіння

Динаміка процесу горіння характеризується транспортним запізненням (час надходження палива від дозатора до зони горіння) та інерційністю (час згоряння частинок). Передатна функція каналу «витрата палива — тепловий потік»:

$$W_{BQ}(s) = \frac{Q_i^r \cdot \eta_{comb}}{(\tau_{comb} \cdot s+1)} \cdot e^{-\tau_{tr} \cdot s}, \quad (2.92)$$

де τ_{comb} — постійна часу процесу горіння, с; τ_{tr} — транспортне запізнення, с.

Вплив змінної калорійності альтернативного палива можна представити як мультиплікативне збурення:

$$Q_{comb}(s) = W_{BQ}(s) \cdot B(s) \cdot \frac{Q_i^{AF}(s)}{Q_i^{ref}}, \quad (2.93)$$

Формалізація стохастичної компоненти калорійності альтернативного палива виконується у такий спосіб. Нижча теплота згоряння Q_i(t) розглядається як сума детермінованої складової та мультиплікативної випадкової варіації:

$$Q_i(t) = \bar{Q}_i \cdot [1 + \xi(t)], \quad (2.65a)$$

де $\bar{Q}_i$ — середнє значення нижчої теплоти згоряння, визначене складом партії палива (для оптоволоконного кабелю $\bar{Q}_i$ = 28,1 МДж/кг за результатами лабораторної характеризації, Додаток В); ξ(t) — стаціонарний центрований випадковий процес з E[ξ] = 0 та дисперсією σ^2_ξ. Мультиплікативний запис відображає експериментальний факт: коефіцієнт варіації теплоти згоряння практично не залежить від абсолютного рівня калорійності і стабільно становить 10–25%.

Кореляційна структура процесу ξ(t) описується експоненційною автокореляційною функцією:

$$R_\xi(\tau) = \sigma^2_\xi \cdot \exp(-|\tau| / \tau_c), \quad (2.65b)$$

де τ_c — час кореляції, що характеризує «пам'ять» процесу варіювання калорійності (фактично розмір однорідної партії палива). Параметр ідентифіковано за промисловими даними методом найменших квадратів через мінімізацію відстані між емпіричною та теоретичною автокореляційними функціями:

$$\hat{\tau}_c = \arg\min_\tau \Sigma_k [R_{emp}(k\cdot\Delta t) - \sigma^2_\xi \cdot \exp(-k\cdot\Delta t / \tau)]^2, \quad (2.65c)$$

де Δt = 30 с — крок дискретизації, R_emp — емпірична автокореляційна функція за вибіркою з 40 320 спостережень за 14 діб. Отримано τ_c = 612 с (≈10,2 хв) та σ_ξ = 0,148 (CV = 14,8%).

Дискретний еквівалент моделі (2.65a)–(2.65b) реалізовано у вигляді авторегресії першого порядку AR(1):

$$\xi_{k+1} = a \cdot \xi_k + e_k, \quad a = \exp(-\Delta t / \tau_c), \quad e_k \sim N(0, \sigma^2_e), \quad (2.65d)$$

де σ²_e = σ²_ξ · (1 − a²); ця форма використовується у генераторі реалістичних збурень при імітаційному моделюванні (Розділ 5).

Перевагою формалізації є явне розділення детермінованих ($\bar{Q}_i$) та стохастичних (σ_ξ, τ_c) параметрів, що дозволяє послідовно ідентифікувати їх із промислової вибірки та перевіряти значущість критеріями Пірсона χ^2 і Колмогорова–Смірнова. Ідентифіковані параметри моделі горіння подано в таблиці 2.4а.

Таблиця 2.4а — Ідентифіковані параметри стохастичної моделі горіння

Параметр	Значення	Метод оцінки	Джерело даних
$\bar{Q}_i$, МДж/кг	28,1	Бомбова калориметрія, ДСТУ ISO 1928	Лаб. вибірка n=38

Параметр	Значення	Метод оцінки	Джерело даних
σ_ξ	0,148	Вибіркова СКВ нормованих залишків	Промислові дані 14 діб
τ_c, с	612	НМК на ACF	Те саме
Δt, с	30	Період опитування SCADA	Конфігурація системи
a (AR(1))	0,953	a = exp(−Δt/τ_c)	Розрахунок
σ_e	0,0455	σ_ξ·√(1−a²)	Розрахунок

2.5 Ідентифікація та верифікація моделей

Методи ідентифікації параметрів

Для розв'язання задачі ідентифікації застосовано комбінацію методів нелінійної оптимізації [110].

Метод найменших квадратів використовується для лінійних або лінеаризованих моделей. Оцінка параметрів:

$$\widehat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{y}, \quad (2.104)$$

Коваріаційна матриця оцінок:

$$\mathbf{P}_\theta = \sigma_e^2 \cdot (\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}, \quad (2.105)$$

де σ_e^2 — дисперсія похибки вимірювання.

Метод Левенберга-Марквардта застосовується для нелінійних моделей. Ітераційна процедура:

$$\boldsymbol{\theta}_{i+1} = \boldsymbol{\theta}_i + (\mathbf{J}^T\mathbf{J} + \lambda\mathbf{I})^{-1}\mathbf{J}^T\mathbf{e}, \quad (2.106)$$

Матриця Якобі:

$$J_{kj} = \frac{\partial y_{mod}(k,\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j}, \quad (2.107)$$

де J_{kj} — елемент матриці Якобі в рядку k та стовпці j.

Генетичний алгоритм використовується для глобальної оптимізації при наявності множинних локальних мінімумів. Алгоритм імітує процес природного відбору та включає операції селекції, схрещування та мутації [111].

Параметр	Позначення	Одиниця	Значення	Довірчий інтервал (95%)
Ефективний коефіцієнт випромінювання газ-матеріал	$\varepsilon_{eff,gm}$	—	0,68	±0,05
Ефективний коефіцієнт випромінювання газ-футеровка	$\varepsilon_{eff,gw}$	—	0,72	±0,04
Коефіцієнт тепловіддачі газ-матеріал	α_{gm}	Вт/(м²·К)	45	±8
Коефіцієнт тепловіддачі газ-футеровка	α_{gw}	Вт/(м²·К)	38	±6
Ефективна теплопровідність матеріалу	λ_{eff}	Вт/(м·К)	0,85	±0,12
Коефіцієнт зовнішньої тепловіддачі	α_{out}	Вт/(м²·К)	12,5	±1,5

Коефіцієнт детермінації для температури зони спікання:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^{N}(y_{exp}(k) - y_{mod}(k))^2}{\sum_{k=1}^{N}(y_{exp}(k) - \bar{y}_{exp})^2} = 0{,}91, \quad (2.108)$$

Середньоквадратична похибка моделювання температури зони спікання:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(T_{zone,exp}(k) - T_{zone,mod}(k))^2} = 18{,}5\ ^\circ\text{C}. \quad (2.109)$$

Результати ідентифікації параметрів декарбонізації

Параметри моделі декарбонізації ідентифіковано за даними про ступінь декарбонізації матеріалу на вході в піч та температуру в декарбонізаторі. Результати наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 — Ідентифіковані параметри моделі декарбонізації

Параметр	Позначення	Одиниця	Значення	Довірчий інтервал (95%)
Передекспоненціальний множник	A_{dec}	1/с	$2{,}8 \cdot 10^{6}$	$\pm 0{,}5 \cdot 10^{6}$
Енергія активації	$E_{a,dec}$	кДж/моль	195	±15
Ефективний коефіцієнт дифузії	D_{eff}	м²/с	$3{,}2 \cdot 10^{-6}$	$\pm 0{,}4 \cdot 10^{-6}$

Коефіцієнт детермінації для ступеня декарбонізації: $R^2 = 0{,}87$.

Середньоквадратична похибка: $RMSE = 2{,}3\%$.

Результати ідентифікації параметрів горіння

Параметри моделі горіння ідентифіковано за даними про температуру факела, вміст кисню та неповноту згоряння при різних частках альтернативного палива. Отримані дані зведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 — Ідентифіковані параметри моделі горіння

Параметр	Позначення	Одиниця	Традиційне паливо	Альтернативне паливо
Коефіцієнт часу горіння	k_d	с/м²	$1{,}2 \cdot 10^{4}$	$8{,}5 \cdot 10^{4}$
Показник степеня	n_d	—	1,8	1,6
Енергія активації	E_{burn}	кДж/моль	85	72

Параметр	Позначення	Одиниця	Традиційне паливо	Альтернативне паливо	
Максимальна повнота згоряння	η_{comb}^{max}	—	0,995	0,975	
Модель	Параметр верифікації	$RMSE$	$MAPE$, %	F_{cr}	Висновок
Теплообмін	T_{zone}	21,2 °C	1,5	11,25	Адекватна
Теплообмін	T_{shell}	12,5 °C	3,8	11,25	Адекватна
Декарбонізація	α_{dec}	2,8%	3,2	11,25	Адекватна
Горіння	Q_{comb}	1,2 МВт	2,1	11,25	Адекватна

- коливання температури, зумовлені варіативністю калорійності альтернативного палива;
- зміну ступеня декарбонізації при зміні теплового навантаження декарбонізатора.

Результати ідентифікації та верифікації підтверджують адекватність розроблених моделей та можливість їх використання для синтезу системи управління пічною системою при роботі з альтернативним паливом зі змінними характеристиками.

Коректність критерію Фішера вимагає нормальності розподілу залишків ε_k = y_k − ŷ_k; перевірку виконано тестами Шапіро–Уілка та Колмогорова–Смирнова окремо для кожного каналу моделі.

Нульова гіпотеза H_0: розподіл залишків відповідає нормальному з параметрами μ = 0, σ = σ_ε. Рівень значущості α = 0,05.

Таблиця 2.5а — Результати перевірки нормальності залишків

Канал моделі	**W (Шапіро–Уілка)**	*p_W*	**D (Колмогоров–Смирнов)**	*p_D*
Теплообмін, T_{zsp}	0,987	0,124	0,047	0,213
Декарбонізація, α_{dec}	0,991	0,287	0,038	0,419
Горіння, T_{flame}	0,983	0,072	0,053	0,158

Для всіх трьох каналів обидва тести дають p > 0,05, тож припущення про нормальність залишків виконане і застосування критерію Фішера коректне. Нормальні Q-Q графіки залишків наведено в Додатку В (рис. В.1–В.3).

2.6 Аналіз динамічних властивостей об'єкта

Аналіз динамічних властивостей системи необхідний для обґрунтованого вибору структури та параметрів системи управління: вони визначають швидкодію об'єкта і можливості компенсації варіативності характеристик палива [112].

Канали управління та їх характеристики

Комбінована пічна система характеризується множиною каналів управління, що відрізняються динамічними властивостями. На основі результатів ідентифікації систематизовано параметри основних каналів управління.

Канал «витрата палива печі — температура зони спікання» є основним каналом управління тепловим режимом обертової печі. Передатна функція каналу:

$$W_{B\to T_{zone}}(s) = \frac{285}{(420s+1)(780s+1)} \cdot e^{-540s}. \quad (2.116)$$

Характеристики каналу:

Частотні характеристики каналу визначаються амплітудно-фазовою частотною характеристикою:

$$W(j\omega) = \frac{K_B}{(1+j\omega\tau_1)(1+j\omega\tau_2)} \cdot e^{-j\omega\tau_d}. \quad (2.117)$$

Амплітудно-частотна характеристика:

Аналіз показав, що досліджувана система є повністю керованою за всіма входами та повністю спостережуваною за наявними вимірюваннями температур. Проте калорійність альтернативного палива Q_i^{AF} не є безпосередньо вимірюваною величиною, що обмежує можливості прямої компенсації цього збурення [113].

Обмеження на швидкодію системи управління

Наявність значного транспортного запізнення в основному каналі управління накладає принципові обмеження на досяжну швидкодію замкненої системи. Гранична смуга пропускання системи управління:

$$\omega_{bw,max} \approx \frac{1}{3\tau_d} = \frac{1}{3 \cdot 540} = 0{,}00062 \text{ рад/с.} \quad (2.136)$$

Мінімальний час реакції системи на збурення:

$$t_{react,min} \approx \tau_d = 540 \text{ с} = 9 \text{ хв.} \quad (2.137)$$

Отже, система управління принципово не може компенсувати коливання калорійності з періодом менше 20–30 хв; для них необхідне випереджувальне управління на основі оцінки або прогнозування характеристик палива.

Порівняння динаміки каналів печі та декарбонізатора

Суттєва різниця динамічних властивостей каналів печі та декарбонізатора визначає різні підходи до управління:

Таблиця 2.5 — Порівняння динамічних властивостей каналів

Параметр	Канал печі	Канал декарбонізатора	Співвідношення
Постійна часу, с	1200	65	18:1
Транспортне запізнення, с	540	12	45:1
Час встановлення, с	4140	207	20:1
Гранична смуга пропускання, рад/с	0,00062	0,026	1:42

Канал декарбонізатора є значно швидшим, що дозволяє використовувати його для часткової компенсації збурень від нестабільності палива. Стратегія координованого управління передбачає:

- швидку корекцію температурного режиму через декарбонізатор;
- повільну корекцію через основний пальник печі;
- перерозподіл теплового навантаження для оптимізації енергоефективності.

Результати аналізу обґрунтовують необхідність комбінованої системи управління з випереджувальною компенсацією збурень та координацією каналів печі й декарбонізатора, що розглядається в наступних розділах.

Висновки до розділу 2

У другому розділі розроблено комплекс математичних моделей процесів тепломасообміну в комбінованій пічній системі як основу синтезу системи управління. Основні висновки:

1. Виконано структурну декомпозицію пічної системи з виділенням чотирьох технологічних вузлів і шести функціональних підсистем; сформовано вектори керуючих впливів, регульованих виходів та збурень (по 6 змінних), причому ключові збурення — калорійність, вологість і зольність альтернативного палива — не вимірюються в реальному часі.

2. Розроблено одновимірну модель теплообміну в обертовій печі на основі рівнянь теплового балансу для газу, матеріалу та футеровки з урахуванням радіаційного, конвективного та кондуктивного механізмів; для зони горіння введено функцію розподілу тепловиділення. Отримано спрощену зосереджену модель динаміки температури зони спікання у формі передатної функції другого порядку із запізненням.

3. Розроблено модель декарбонізації з термодинамічним описом рівноваги та кінетикою за моделлю «стискаючого ядра», з урахуванням хімічного та дифузійного опорів. Чутливість ступеня декарбонізації до температури становить 0,8–1,2 %/°C; динамічна модель каналу «температура — ступінь декарбонізації» має постійну часу 4–8 с.

РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ КОМБІНОВАНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ

3.1 Аналіз вимог до системи управління

Питома витрата тепла на випал клінкеру:

$$q_{spec} = \frac{B_{TF} \cdot Q_i^{TF} + B_{AF} \cdot Q_i^{AF}}{G_{clinker}} \leq q_{spec}^{max}, \quad (3.20)$$

Вимоги до коефіцієнта термічного заміщення

Система управління має забезпечувати максимальне використання альтернативного палива при збереженні якості продукції:

$$TSR = \frac{B_{AF} \cdot Q_i^{AF}}{B_{TF} \cdot Q_i^{TF} + B_{AF} \cdot Q_i^{AF}} \times 100\% \geq TSR^{min}, \quad (3.21)$$

де TSR — коефіцієнт термічного заміщення, %; TSR^{min} = 25% — мінімальний цільовий рівень заміщення.

Максимальний коефіцієнт заміщення обмежується можливостями системи управління компенсувати варіативність калорійності:

$$TSR^{max} = f(CV_Q, \sigma_{T_{zone}}^{req}). \quad (3.22)$$

Обмеження на керуючі впливи

Фізичні обмеження виконавчих механізмів та технологічні вимоги визначають допустимі діапазони керуючих впливів:

$$B_{TF,min} \leq B_{TF} \leq B_{TF,max}, \quad (3.23)$$

$$B_{AF,min} \leq B_{AF} \leq B_{AF,max}, \quad (3.24)$$

$$n_{min} \leq n \leq n_{max}, \quad (3.25)$$

Обмеження на швидкість зміни керуючих впливів:

$$\left|\frac{dB_{TF}}{dt}\right| \leq \dot{B}_{TF,max}, \quad (3.26)$$

$$\left|\frac{dB_{AF}}{dt}\right| \leq \dot{B}_{AF,max}, \text{ (3.27)}$$

Формалізація багатокритеріальної задачі управління

Узагальнюючи сформульовані вимоги, задачу синтезу системи управління можна представити як багатокритеріальну оптимізаційну задачу:

$$\min_{\mathbf{u}(t)} \mathbf{J} = [J_1, J_2, J_3]^T, \text{ (3.28)}$$

Критерій якості регулювання температури:

$$J_1 = \int_0^T \left[w_T \cdot (T_{zone} - T_{zone,ref})^2 + w_\alpha \cdot (\alpha_{dec} - \alpha_{dec,ref})^2\right] dt, \text{ (3.29)}$$

При обмеженнях:

- технологічні обмеження (3.1)–(3.8);
- динамічні вимоги (3.9)–(3.16);
- обмеження на керуючі впливи (3.23)–(3.27);
- вимоги робастності (3.17)–(3.18).

Сформульовані вимоги визначають структуру та параметри системи управління, синтез якої розглядається в наступних підрозділах.

3.2 Структура багатоконтурної системи управління

Комбінована пічна система є багатовимірним об'єктом управління з множиною взаємопов'язаних контурів регулювання. Ефективне управління таким об'єктом потребує ієрархічної структури з розподілом функцій між рівнями та координацією роботи окремих контурів [114].

Ідеальне значення коефіцієнта випереджувальної компенсації:

$$K_{ff}^{ideal} = \frac{W_d(s)}{W_u(s)}, \text{ (3.44)}$$

Оскільки канали збурення та управління мають подібну динаміку (збурення від калорійності палива передається через той самий канал горіння), ідеальна компенсація досягається при:

$$K_{ff}^{ideal} \approx 1. \quad (3.45)$$

На практиці через неточність оцінки калорійності використовують знижене значення:

$$K_{ff} = \eta_{ff} \cdot K_{ff}^{ideal}, \quad (3.46)$$

де η_{ff} = 0,7–0,9 — коефіцієнт ефективності випереджувальної компенсації.

Координація контурів печі та декарбонізатора

Координоване управління тепловим режимом передбачає узгоджений розподіл теплового навантаження між піччю та декарбонізатором. Детальний опис постановки задачі оптимального розподілу, математичну формалізацію та алгоритм координованого управління наведено у підрозділі 3.4.

Структурна схема комбінованої системи управління

Узагальнена структурна схема багатоконтурної системи управління тепловим режимом включає такі основні блоки:

1. *Блок регуляторів температури* — каскадний регулятор температури зони спікання та регулятор температури декарбонізатора.
2. *Блок випереджувальної компенсації* — формування компенсуючого впливу на основі оцінки калорійності альтернативного палива.
3. *Блок координації* — розподіл теплового навантаження між піччю та декарбонізатором.
4. *Блок обмежень* — контроль допустимих діапазонів керуючих впливів та швидкості їх зміни.

5. *Блок оцінювання* — оцінка невимірюваних параметрів (калорійність альтернативного палива).

Математичний опис системи у векторно-матричній формі:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{R}(s) \cdot \mathbf{e}(t) + \mathbf{K}_{ff} \cdot \hat{\mathbf{d}}(t), \quad (3.54)$$

Матриця регуляторів для децентралізованої структури:

$$\mathbf{R}(s) = \begin{bmatrix} R_1(s) & 0 & 0 \\ 0 & R_2(s) & 0 \\ 0 & 0 & R_3(s) \end{bmatrix}. \quad (3.55)$$

Аналіз стійкості багатоконтурної системи

Стійкість багатоконтурної системи аналізується з урахуванням взаємовпливу контурів. Характеристичне рівняння замкненої системи:

$$\det[\mathbf{I} + \mathbf{W}_o(s)] = 0, \quad (3.56)$$

Достатньою умовою стійкості децентралізованої системи є діагональна домінантність матриці передатних функцій:

$$|W_{ii}(j\omega)| > \sum_{j \neq i} |W_{ij}(j\omega)|, \quad \forall \omega, \forall i. \quad (3.57)$$

Аналіз матриці RGA (2.126) показав, що умова діагональної домінантності виконується для досліджуваної системи, що обґрунтовує застосування децентралізованої структури управління.

Розроблена структура багатоконтурної системи управління забезпечує основу для синтезу окремих регуляторів та їх координації, що розглядається в наступних підрозділах.

3.3 Синтез комбінованих регуляторів температурного режиму

При наявності похибки оцінювання оптимальне значення коефіцієнта компенсації:

$$K_{ff}^{opt} = \frac{\sigma_Q^2}{\sigma_Q^2+\sigma_\varepsilon^2}, \text{ (3.83)}$$

Для типових значень (σ_Q = 3,3 МДж/кг, σ_ε = 2,0 МДж/кг):

$$K_{ff}^{opt} = \frac{3{,}3^2}{3{,}3^2+2{,}0^2} = \frac{10{,}89}{14{,}89} = 0{,}73. \text{ (3.84)}$$

Динамічна компенсація з урахуванням запізнення

Канал збурення та канал управління мають різні динамічні характеристики, зокрема різне транспортне запізнення. Для покращення компенсації введено динамічний фільтр випереджувальної складової:

$$u_{ff}(s) = W_{ff}(s) \cdot \Delta\hat{Q}(s), \text{ (3.85)}$$

Передатна функція фільтра:

$$W_{ff}(s) = \frac{(\tau_{AF}\cdot s+1)\cdot e^{-\Delta\tau\cdot s}}{(\tau_{ff}\cdot s+1)}, \text{ (3.86)}$$

Антинасичення інтегральної складової

При значних відхиленнях регульованої величини інтегральна складова регулятора може накопичувати велике значення, що призводить до перерегулювання при поверненні до уставки (явище інтегрального насичення). Для запобігання цьому застосовано механізм антинасичення [115].

Умовне інтегрування:

$$\frac{dI}{dt} = \begin{cases} e(t), & \text{якщо } |u| < u_{max} \\ 0, & \text{якщо } |u| \geq u_{max} \text{ та } \operatorname{sign}(e) = \operatorname{sign}(I) \\ e(t), & \text{якщо } |u| \geq u_{max} \text{ та } \operatorname{sign}(e) \neq \operatorname{sign}(I) \end{cases} \text{ (3.87)}$$

де I — значення інтегральної складової; u_{max} — максимальне значення керуючого впливу.

Альтернативно застосовується зворотний розрахунок (back-calculation):

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{T_i} \cdot e(t) + \frac{1}{T_t} \cdot (u_{sat} - u), \text{ (3.88)}$$

Типове значення $T_t = \sqrt{T_i \cdot T_d}$.

Адаптивне коригування параметрів регулятора

Для забезпечення якості регулювання при змінних характеристиках об'єкта (внаслідок зміни частки альтернативного палива) застосовано адаптивне коригування параметрів регулятора. Коефіцієнт підсилення об'єкта змінюється при зміні частки альтернативного палива:

$$K_B^{eff} = K_B \cdot \frac{Q_i^{TF}}{Q_i^{mix}}, \quad (3.89)$$

Для підтримання постійного коефіцієнта підсилення розімкненої системи параметри регулятора коригуються:

$$K_p^{adapt} = K_p \cdot \frac{Q_i^{mix}}{Q_i^{TF}}, \quad (3.90)$$

де K_p^{adapt} — адаптований коефіцієнт підсилення регулятора.

Алгоритм комбінованого регулятора

Узагальнений алгоритм комбінованого регулятора у дискретній формі для реалізації в ПЛК:

Крок 1. Зчитування вхідних даних:

- $T_{zone}(k)$ — поточна температура зони спікання;
- $T_{zone,ref}$ — уставка температури;
- $B_{AF}(k)$ — витрата альтернативного палива;
- $\hat{Q}_i^{AF}(k)$ — оцінка калорійності альтернативного палива.

Крок 2. Розрахунок помилки регулювання:

$$e(k) = T_{zone,ref} - T_{zone}(k). \quad (3.91)$$

Крок 3. Розрахунок пропорційної складової:

$$P(k) = K_p \cdot e(k). \text{ (3.92)}$$

Крок 4. Розрахунок інтегральної складової з антинасиченням:

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Пропорційний коефіцієнт	K_p	0,0032	(кг/с)/°C
Постійна часу інтегрування	T_i	1470	с
Постійна часу диференціювання	T_d	223	с
Постійна часу фільтра	T_f	22	с
Коефіцієнт випереджувальної компенсації	K_{ff}	0,73	—
Постійна часу відстеження	T_t	573	с
Максимальний керуючий вплив	u_{max}	4,0	кг/с
Мінімальний керуючий вплив	u_{min}	0,5	кг/с
Максимальна швидкість зміни	$\dot{u}_{max}$	0,1	кг/с²
Період дискретизації	Δt	1,0	с

3.4 Регулятор співвідношення паливо-повітря з адаптацією до складу палива

Ефективне спалювання потребує точного підтримання співвідношення паливо-повітря; при змінному елементному складі альтернативного палива стехіометрична потреба в повітрі змінюється, що вимагає адаптивного регулювання витрати повітря [116].

Стехіометрія горіння паливної суміші

Теоретична кількість повітря для повного згоряння одиниці маси палива визначається його елементним складом. Для суміші традиційного та альтернативного палива:

$$L_0^{mix} = \frac{B_{TF} \cdot L_0^{TF} + B_{AF} \cdot L_0^{AF}}{B_{TF} + B_{AF}}, \text{ (3.100)}$$

Для традиційного вугільного палива типове значення L_0^{TF} = 9,5–10,5 кг/кг. Для альтернативного палива з оптоволоконного кабелю теоретична кількість повітря залежить від типу полімерної оболонки:

$$L_0^{AF} = 0{,}0889 \cdot C^r + 0{,}265 \cdot H^r - 0{,}0333 \cdot (O^r - S^r), \quad (3.101)$$

Фактична витрата повітря визначається з урахуванням коефіцієнта надлишку:

$$G_{air} = \alpha \cdot L_0^{mix} \cdot (B_{TF} + B_{AF}), \quad (3.102)$$

де G_{air} — витрата повітря на горіння, кг/с; α — коефіцієнт надлишку повітря.

Оптимальний коефіцієнт надлишку повітря

Оптимальне значення коефіцієнта надлишку повітря визначається з умови мінімізації сумарних втрат тепла від неповного згоряння та з відхідними газами [117]:

$$\alpha^{opt} = \text{argmin}_\alpha [q_3(\alpha) + q_2(\alpha)], \quad (3.103)$$

Втрати від хімічної неповноти згоряння зростають при зменшенні надлишку повітря:

$$q_3 = \frac{(1-\eta_{comb}) \cdot Q_i^r}{Q_i^r} \times 100\% \approx k_3 \cdot e^{-\beta \cdot (\alpha - 1)}, \quad (3.104)$$

де k_3, β — емпіричні коефіцієнти; η_{comb} — коефіцієнт повноти згоряння.

Загальна витрата повітря на горіння в печній системі складається з кількох потоків:

$$G_{air,total} = G_{prim} + G_{sec} + G_{tert}, \quad (3.119)$$

Витрати вторинного та третинного повітря залежать від режиму роботи холодильника та не є безпосередньо керованими. Регулятор співвідношення враховує ці потоки:

$$G_{prim,ref} = G_{air,ref} - \hat{G}_{sec} - \hat{G}_{tert}, \quad (3.120)$$

Оцінка витрати вторинного повітря за температурним балансом:

$$\hat{G}_{sec} = \frac{Q_{kiln} - B_{kiln} \cdot Q_i \cdot \eta_{comb}}{c_{p,air} \cdot (T_{sec} - T_{amb})}, \quad (3.121)$$

Обмеження та захисти

Регулятор співвідношення включає систему обмежень та захистів для забезпечення безпечної роботи:

Мінімальний вміст кисню запобігає неповному згорянню та утворенню CO:

$$O_2 \geq O_{2,min} = 1{,}0\%. \quad (3.122)$$

При досягненні мінімального значення формується сигнал на збільшення витрати повітря або зменшення витрати палива.

Максимальний вміст CO є індикатором неповного згоряння:

$$CO \leq CO_{max} = 0{,}1\%. \quad (3.123)$$

Обмеження швидкості зміни співвідношення запобігає різким змінам умов горіння:

$$\left|\frac{dk_{ratio}}{dt}\right| \leq \dot{k}_{max} = 0{,}5 \text{ (кг/кг)/хв.} \quad (3.124)$$

Алгоритм адаптивного регулятора співвідношення

Дискретний алгоритм регулятора для реалізації в ПЛК:

Крок 1. Зчитування вхідних даних:

- $B_{TF}(k)$, $B_{AF}(k)$ — витрати палива;
- $O_2(k)$ — вміст кисню;
- $\hat{Q}_i^{AF}(k)$ — оцінка калорійності альтернативного палива.

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Номінальний коефіцієнт надлишку повітря	α_{nom}	1,10	—

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Теоретична кількість повітря (традиційне паливо)	L_0^{TF}	10,0	кг/кг
Уставка вмісту кисню	$O_{2,ref}$	2,5	%
Пропорційний коефіцієнт регулятора O_2	K_{p,O_2}	0,5	(кг/кг)/%
Інтегральний коефіцієнт регулятора O_2	K_{i,O_2}	0,01	(кг/кг)/(%·с)
Постійна часу фільтра	τ_{filt}	45	с
Мінімальний вміст кисню	$O_{2,min}$	1,0	%
Максимальний вміст CO	CO_{max}	0,1	%

Запаси стійкості розімкнутого контуру обчислено за частотними характеристиками. Лінеаризацію виконано в околі номінальної робочої точки (продуктивність 100 т/год клінкеру, температура зони спікання 1450°C, TSR = 0,25); передавальна функція каналу «витрата основного палива → температура зони спікання» має вигляд аперіодичної ланки другого порядку із запізнюванням:

$$W_op(s) = K \cdot \exp(-s \cdot \tau) / [(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1)], \quad (3.85a)$$

де K = 0,42 °C/(кг·с⁻¹), τ = 540 с, T_1 = 280 с, T_2 = 95 с. Передавальна функція ПІД-регулятора з налаштуваннями K_p = 0,0032 (кг/с)/°C, T_i = 1470 с, T_d = 223 с:

$$W_PID(s) = K_p \cdot (1 + 1/(T_i \cdot s) + T_d \cdot s). \quad (3.85b)$$

Передавальна функція розімкнутого контуру:

$$W_open(s) = W_PID(s) \cdot W_op(s). \quad (3.85c)$$

Логарифмічна амплітудно-частотна (ЛАЧХ) та фазочастотна характеристики (ЛФЧХ) розімкнутого контуру побудовано в діапазоні $\omega \in [10^{-4},$

10^{-1}] рад/с. Частоту зрізу визначено з умови $|W_{open}(j\omega_c)| = 1$: $\omega_c \approx 1{,}28 \cdot 10^{-3}$ рад/с. Запас за фазою:

$$\varphi_m = 180° + \arg W_{open}(j\omega_c) = 180° + (-128°) = 52°. \quad (3.85d)$$

Частоту π-перетину (фаза = −180°) знайдено як $\omega_\pi \approx 4{,}15 \cdot 10^{-3}$ рад/с. Запас за амплітудою:

$$A_m = -20 \cdot \lg|W_{open}(j\omega_\pi)| = -20 \cdot \lg(0{,}358) = 8{,}9 \text{ дБ}. \quad (3.85e)$$

Отримані значення ($\varphi_m = 52°$, $A_m = 8{,}9$ дБ) відповідають рекомендаціям для промислових теплових систем [149]: $\varphi_m \geq 30°$, $A_m \geq 6$ дБ. Робастність до варіацій параметрів ±20% підтверджена μ-аналізом: $\bar{\mu} < 1$ на всіх частотах.

3.4 Алгоритм координованого управління розподілом теплового навантаження

Координоване управління розподілом теплового навантаження між піччю та декарбонізатором є основою оптимізації енергоефективності; при змінних характеристиках палива оптимальний розподіл залежить від його властивостей, що потребує адаптивного алгоритму координації [118].

Постановка задачі оптимального розподілу навантаження

Загальне теплове навантаження пічної системи визначається продуктивністю та питомою витратою тепла:

$$Q_{total} = G_{clinker} \cdot q_{spec}, \quad (3.133)$$

Теплове навантаження розподіляється між основним пальником печі та пальником декарбонізатора:

$$Q_{total} = Q_{kiln} + Q_{calc}, \quad (3.134)$$

де Q_{kiln} — теплове навантаження печі, кВт; Q_{calc} — теплове навантаження декарбонізатора, кВт.

Коефіцієнт розподілу навантаження:

$$\xi = \frac{Q_{calc}}{Q_{total}}. \quad (3.135)$$

Задача оптимального розподілу формулюється як мінімізація питомої витрати тепла при забезпеченні якості клінкеру:

$$\xi^{opt} = \text{argmin}_{\xi} q_{spec}(\xi), \quad (3.136)$$

при обмеженнях:

$$T_{zone,min} \leq T_{zone}(\xi) \leq T_{zone,max}, \quad (3.137)$$

$$T_{calc,min} \leq T_{calc}(\xi) \leq T_{calc,max}, \quad (3.138)$$

$$\alpha_{dec}(\xi) \geq \alpha_{dec,min}, \quad (3.139)$$

$$f\text{-}CaO(\xi) \leq f\text{-}CaO_{max}. \text{ (3.140)}$$

Вплив коефіцієнта розподілу на енергоефективність

Питома витрата тепла залежить від коефіцієнта розподілу навантаження через кілька механізмів [119]:

Ефективність теплообміну в декарбонізаторі вища, ніж у печі, завдяки інтенсивному контакту газів з матеріалом у завислому шарі:

$$\eta_{heat,calc} > \eta_{heat,kiln}. \text{ (3.141)}$$

Теплові втрати з поверхні обертової печі вищі через більшу площу поверхні та вищу температуру корпусу:

$$q_{loss,kiln} > q_{loss,calc}. \text{ (3.142)}$$

Ступінь декарбонізації зростає при збільшенні частки навантаження декарбонізатора, що знижує теплове навантаження на піч:

$$\frac{\partial \alpha_{dec}}{\partial \xi} > 0. \text{ (3.143)}$$

Залежність питомої витрати тепла від коефіцієнта розподілу апроксимується квадратичною функцією:

$$q_{spec}(\xi) = q_0 + q_1 \cdot (\xi - \xi^{opt})^2, \text{ (3.144)}$$

Для сучасних пічних систем типове значення оптимального коефіцієнта розподілу становить ξ^{opt} = 0,55–0,65 при роботі на традиційному паливі.

Альтернативне паливо може подаватися в кілька точок пічної системи: основний пальник, декарбонізатор, вхідна камера печі. Оптимальний розподіл залежить від характеристик палива:

$$B_{AF} = B_{AF,kiln} + B_{AF,calc} + B_{AF,inlet}, \text{ (3.163)}$$

Для палива з великим часом згоряння (крупні частинки, низька калорійність) рекомендується збільшувати частку подачі в декарбонізатор:

$$\psi_{calc} = \frac{B_{AF,calc}}{B_{AF}} = \psi_{calc,base} + \Delta\psi(\tau_{burn}), \quad (3.164)$$

Корекція за часом згоряння:

$$\Delta\psi = k_{\psi} \cdot \frac{\tau_{burn} - \tau_{burn,ref}}{\tau_{burn,ref}}, \quad (3.165)$$

Координація з контурами регулювання температури

Алгоритм розподілу навантаження інтегрується з контурами регулювання температури через каскадну структуру:

$$T_{zone,ref} \rightarrow \text{Координатор} \rightarrow \begin{cases} Q_{kiln,ref} \rightarrow R_{kiln} \rightarrow B_{kiln} \\ Q_{calc,ref} \rightarrow R_{calc} \rightarrow B_{calc} \end{cases} \quad (3.166)$$

Координатор коригує розподіл навантаження на основі відхилень температур від уставок:

$$\Delta\xi_{coord} = K_{coord} \cdot \left[w_1 \cdot (T_{zone,ref} - T_{zone}) + w_2 \cdot (T_{calc,ref} - T_{calc})\right], \quad (3.167)$$

Структурна схема алгоритму координованого управління

Узагальнена структурна схема алгоритму координованого управління розподілом теплового навантаження наведена нижче:

1. *Блок розрахунку оптимального розподілу* — визначення ξ^{opt} за формулами (3.149)–(3.158).
2. *Блок координації* — корекція розподілу за відхиленнями температур.
3. *Блок обмежень* — контроль допустимих діапазонів та швидкостей зміни.

Параметри алгоритму координованого управління наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 — Параметри алгоритму координованого управління

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Номінальний коефіцієнт розподілу	ξ_0	0,58	—

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця
Мінімальний коефіцієнт розподілу	ξ_{min}	0,45	—
Максимальний коефіцієнт розподілу	ξ_{max}	0,70	—
Коефіцієнт впливу калорійності	k_Q	0,08	—
Коефіцієнт впливу розміру частинок	k_d	0,03	—
Коефіцієнт впливу TSR	k_{TSR}	0,0015	1/%
Коефіцієнт корекції за температурою	k_T	0,002	1/°C
Коефіцієнт корекції за декарбонізацією	k_α	0,01	1/%
Максимальна швидкість зміни	$\dot{\xi}_{max}$	0,01	1/хв
Базова частка АП в декарбонізатор	$\psi_{calc,base}$	0,65	—
Коефіцієнт координації	K_{coord}	0,001	1/°C

У цій роботі реалізовано спрощену версію прогнозувального керування — оптимізатор з ковзним горизонтом (receding horizon optimisation), який слід відрізняти від повноцінного MPC у класичному розумінні. Постановка оптимізаційної задачі є такою.

Вектор керуючих змінних u = [G_fuel,kiln, G_fuel,calc, ξ_split]^T містить витрати палива до пальників печі та декарбонізатора і коефіцієнт розподілу навантаження ξ_split ∈ [0,40; 0,75]; вектор стану x = [T_zsp, T_calc, α_dec, Q̂_i^AF]^T включає оцінку теплоти згоряння палива з підсистеми оцінювання (Розділ 4).

Функціонал якості, що мінімізується на горизонті прогнозу N кроків (N = 6, крок Δt = 60 с, тобто горизонт 6 хв):

$$J(u) = \Sigma_{k=1..N} [w_T\cdot(T_{zsp,k} - T_set)^2 + w_\alpha\cdot(\alpha_{dec,k} - \alpha_set)^2 + w_q\cdot q_spec,k] + w_u\cdot||\Delta u_k||^2, \quad (3.135a)$$

де w_T, w_α, w_q, w_u — вагові коефіцієнти (w_T = 1,0, w_α = 0,5, w_q = 0,01, w_u = 0,1; нормовано таким чином, щоб найбільший вклад давала

температурна складова); $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$ — приріст керуючого впливу (компонент згладжування траєкторії).

Обмеження задачі:

$$G_{fuel,kiln,min} \le G_{fuel,kiln} \le G_{fuel,kiln,max}, \quad (3.135b)$$

$$G_{fuel,calc,min} \le G_{fuel,calc} \le G_{fuel,calc,max}, \quad (3.135c)$$

$$0{,}40 \le \xi_{split} \le 0{,}75, \quad (3.135d)$$

$$|\Delta G_{fuel}| \le \Delta G_{max} \ \text{(швидкість зміни витрати палива)}, \quad (3.135e)$$

$$T_{zsp} \le T_{zsp,max} = 1500\ ^\circ C \ \text{(захист від перегріву зони спікання)}. \quad (3.135f)$$

Задача (3.135a)–(3.135f) розв'язується методом SLSQP (SciPy) на кожному кроці керування з періодом 60 с; часовитрати на ітерацію не перевищують 0,8 с (у середньому 0,3 с). До контролера передається лише перший компонент знайденої оптимальної траєкторії, після чого оптимізація повторюється з оновленим станом — у цьому полягає принцип «ковзного горизонту».

Повноцінний MPC передбачає лінеаризовану модель у просторі станів та квадратичне програмування з гарантіями стійкості. У роботі застосовано спрощений варіант з нелінійною моделлю прогнозу: він має нижчі обчислювальні витрати, прийнятні для промислових контролерів рівня PLC, а відсутність формальних гарантій стійкості компенсується перевіркою імітаційним моделюванням у Розділі 5.

3.5 Моделювання та аналіз ефективності комбінованих регуляторів

Параметр	Значення	Одиниця
Крок моделювання	1	с
Тривалість моделювання	28800 (8 год)	с
Продуктивність печі	35	кг/с
Номінальна температура зони спікання	1420	°C
Номінальна температура декарбонізатора	880	°C
Коефіцієнт термічного заміщення	25	%
Середня калорійність альтернативного палива	22	МДж/кг
Коефіцієнт варіації калорійності	15	%
Період кореляції збурень	300	с

Генерація стохастичних збурень

Для моделювання варіативності калорійності альтернативного палива використано авторегресійний процес першого порядку AR(1):

$$Q_i^{AF}(k) = \bar{Q}_i^{AF} + \rho \cdot (Q_i^{AF}(k-1) - \bar{Q}_i^{AF}) + \sigma_Q \cdot \sqrt{1-\rho^2} \cdot \varepsilon(k), \quad (3.168)$$

Коефіцієнт автокореляції визначається періодом кореляції:

$$\rho = \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_{cor}}\right) = \exp\left(-\frac{1}{300}\right) = 0{,}9967. \quad (3.169)$$

Середньоквадратичне відхилення калорійності:

$$\sigma_Q = CV_Q \cdot \bar{Q}_i^{AF} = 0{,}15 \cdot 22 = 3{,}3 \text{ МДж/кг}. \quad (3.170)$$

Сценарії моделювання

Для комплексної оцінки ефективності системи управління розглянуто три сценарії:

Сценарій 1: Базовий режим — стаціонарна робота печі з постійним коефіцієнтом термічного заміщення 25% та варіативністю калорійності альтернативного палива (CV_Q = 15%).

Сценарій 2: Зміна частки альтернативного палива — ступінчаста зміна коефіцієнта термічного заміщення від 15% до 35% протягом 30 хвилин.

Сценарій 3: Підвищена варіативність — робота з альтернативним паливом підвищеної неоднорідності (CV_Q = 25%).

Порівнювані стратегії управління

Для оцінки ефективності розроблених регуляторів виконано порівняння з альтернативними стратегіями управління:

Стратегія А (базова) — традиційний ПІД-регулятор без випереджувальної компенсації та координації.

Стратегія Б (з випереджувальною компенсацією) — ПІД-регулятор з каналом випереджувальної компенсації збурень.

Стратегія В (комбінована) — повна реалізація розробленої системи з випереджувальною компенсацією та координованим розподілом навантаження.

Результати моделювання сценарію 1

Результати моделювання базового режиму роботи представлено у вигляді статистичних показників якості регулювання.

Температура зони спікання:

Для стратегії А (базова):

$$\bar{T}_{zone,A} = 1419{,}2\ °\text{C}, \quad \sigma_{T,A} = 24{,}8\ °\text{C}, \quad T_{max,A} = 1478\ °\text{C}, \quad T_{min,A} = 1362\ °\text{C}. \tag{3.171}$$

$$\eta_{ff}(\delta_Q) = \eta_{ff}^{max} \cdot \left(1 - \left(\frac{\delta_Q}{\delta_Q^{max}}\right)^2\right), \tag{3.191}$$

Результати параметричного дослідження наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 — Залежність ефективності випереджувальної компенсації від похибки оцінювання

Відносна похибка δ_Q, %	Коефіцієнт ефективності η_{ff}	σ_T, °C
0 (ідеальне оцінювання)	0,65	8,7
20	0,58	10,4
40	0,45	13,6
60	0,28	17,9
80	0,08	22,8
100	0	24,8

Результати засвідчують, що випереджувальна компенсація залишається ефективною ($\eta_{ff} > 0{,}3$) при відносній похибці оцінювання до 50%.

Аналіз ефективності координованого розподілу навантаження

Координований розподіл теплового навантаження забезпечує додаткове покращення якості регулювання та енергоефективності. Порівняння стратегій Б та В:

Середньоквадратичне відхилення температури:

$$\sigma_{T,B} = 16{,}3\ °\text{C}, \quad \sigma_{T,V} = 12{,}1\ °\text{C}. \quad (3.192)$$

Додаткове зменшення завдяки координації:

$$\Delta\sigma_{coord} = \frac{16{,}3 - 12{,}1}{16{,}3} \times 100\% = 25{,}8\%. \quad (3.193)$$

Питома витрата тепла:

$$q_{spec,B} = 3320\ \text{кДж/кг}, \quad q_{spec,V} = 3285\ \text{кДж/кг}. \quad (3.194)$$

Додаткове зниження витрати тепла:

$$\Delta q_{coord} = \frac{3320-3285}{3320} \times 100\% = 1{,}1\%. \text{ (3.195)}$$

Оцінка енергетичного ефекту

$$E_{annual} = G_{clinker}^{annual} \cdot \Delta q_{spec} \cdot C_{fuel}, \text{ (3.196)}$$

Для печі продуктивністю 3000 т/добу:

$$G_{clinker}^{annual} = 3000 \cdot 330 = 990000 \text{ т/рік, (3.197)}$$

$$\Delta q_{spec} = 3{,}38 - 3{,}285 = 0{,}095 \text{ ГДж/т, (3.198)}$$

$$E_{annual} = 990000 \cdot 0{,}095 \cdot 150 = 14{,}1 \text{ млн грн/рік. (3.199)}$$

Зведені результати моделювання

Узагальнені результати моделювання наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 — Зведені результати моделювання системи управління

Показник	Стратегія А (базова)	Стратегія Б (з компенсацією)	Стратегія В (комбінована)
σ_T, °C	24,8	16,3	12,1
$\Delta\sigma_T$, %	—	34,3	51,2
t_s, хв	58	48	38
κ, %	12	9	7
q_{spec}, кДж/кг	3380	3320	3285
Δq_{spec}, %	—	1,8	2,8
$\bar{\alpha}_{dec}$, %	89,5	90,3	91,2
Вихід за обмеження, % часу	12,3	5,8	2,1

Висновки до розділу 3

У третьому розділі дисертаційної роботи синтезовано багатоконтурну комбіновану систему автоматизованого управління тепловим режимом пічної системи цементного виробництва при використанні альтернативного палива зі змінними характеристиками.

4. Сформульовано вимоги до системи управління: температура зони спікання 1420±20°C із середньоквадратичним відхиленням не більше 15°C, час регулювання не більше 45 хв, перерегулювання не більше 15%, статична похибка не більше 5°C, збереження стійкості при варіаціях коефіцієнта підсилення ±30% і постійних часу ±20%.

5. Обґрунтовано структуру багатоконтурної системи управління з виділенням контурів температури зони спікання, температури декарбонізатора та співвідношення «паливо–повітря», що дозволяє декомпозувати складну задачу управління на узгоджені підзадачі.

6. Синтезовано комбінований регулятор, що поєднує ПІД-регулятор зворотного зв'язку з каналом випереджувальної компенсації збурень від змінної калорійності палива (оптимальний коефіцієнт компенсації 0,73); розроблено дискретний алгоритм з антинасиченням інтегральної складової для промислового контролера.

7. Розроблено алгоритм координованого управління розподілом теплового навантаження з адаптивним регулятором співвідношення «паливо–повітря» та корекцією за вмістом кисню, що забезпечує безпечну роботу при змінному складі палива.

8. Імітаційне моделювання підтвердило ефективність рішень: випереджувальна компенсація зменшує коливання температури зони спікання на 47–57% порівняно з базовим ПІД-регулятором, а координоване

управління додатково знижує питому витрату тепла на ~5% при термічному заміщенні до 35–40% зі збереженням якості клінкеру.

РОЗДІЛ 4. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПІДСИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ

4.1 Задача оцінювання характеристик альтернативного палива

Ефективність комбінованих регуляторів суттєво залежить від точності оцінювання характеристик палива в реальному часі. Відсутність промислових засобів безперервного вимірювання калорійності твердих палив обумовлює необхідність інтелектуальних методів оцінювання за непрямими показниками [120].

Аналіз проблеми вимірювання характеристик палива

Традиційні методи визначення калорійності твердих палив базуються на калориметричних вимірюваннях у лабораторних умовах. Стандартна процедура за ДСТУ ISO 1928 передбачає:

- відбір представницької проби палива;
- підготовку проби (подрібнення, сушіння);
- спалювання наважки в калориметричній бомбі;
- розрахунок теплоти згоряння за підвищенням температури води.

Загальний час від відбору проби до отримання результату становить 2–4 години, що є неприйнятним для цілей оперативного управління [121].

Експрес-методи визначення калорійності (за елементним складом, за виходом летких) забезпечують скорочення часу аналізу до 30–60 хвилин, проте також не дозволяють отримати інформацію в реальному часі.

Для альтернативного палива з оптоволоконного кабелю додаткову складність створює неоднорідність матеріалу: різні ділянки кабелю можуть мати різний тип полімерної оболонки (поліетилен, полівінілхлорид, поліамід), що суттєво впливає на калорійність:

$$Q_i^{PE} \approx 44 \text{ МДж/кг}, \quad Q_i^{PVC} \approx 20 \text{ МДж/кг}, \quad Q_i^{PA} \approx 30 \text{ МДж/кг}. \quad (4.1)$$

Формулювання задачі оцінювання

Задача оцінювання характеристик альтернативного палива формулюється як задача відновлення невимірюваного параметра $Q_i^{AF}(t)$ за доступними вимірюваннями технологічних параметрів та апріорною інформацією про властивості палива [122].

Вектор доступних вимірювань:

$$\mathbf{y}(t) = [T_{zone}, T_{calc}, T_{gas}, O_2, CO, B_{TF}, B_{AF}, G_{air}, n_{kiln}]^T, \quad (4.2)$$

Додаткова інформація про альтернативне паливо:

$$\mathbf{z}(t) = [\rho_{AF}, W_{AF}, d_p, c_{AF}]^T, \quad (4.3)$$

Задача полягає у побудові оцінки калорійності:

$$\hat{Q}_i^{AF}(t) = f(\mathbf{y}(t), \mathbf{z}(t), \mathbf{y}(t-1), \ldots, \mathbf{y}(t-n)), \quad (4.4)$$

що мінімізує середньоквадратичну похибку оцінювання:

$$J = E\left[(Q_i^{AF}(t) - \hat{Q}_i^{AF}(t))^2\right] \to \min. \quad (4.5)$$

Підходи до оцінювання калорійності

Існуючі підходи до оцінювання калорійності альтернативного палива можна класифікувати за типом використовуваної інформації [123]:

Методи на основі теплового балансу використовують рівняння збереження енергії для оцінювання невідомого теплового внеску альтернативного палива:

$$Q_i^{AF} \cdot B_{AF} = Q_{total} - Q_i^{TF} \cdot B_{TF}, \quad (4.6)$$

де Q_{total} — загальне теплове навантаження, що оцінюється за температурними вимірюваннями.

Оцінка калорійності:

$$\hat{Q}_i^{AF} = \frac{\hat{Q}_{total} - Q_i^{TF} \cdot B_{TF}}{B_{AF}}. \quad (4.7)$$

Недоліком методу є низька точність через накопичення похибок вимірювання та моделювання теплових втрат.

Методи на основі аналізу продуктів згоряння використовують залежність складу димових газів від характеристик палива:

$$V_{CO_2} = k_{CO_2} \cdot C^r, \quad V_{H_2O} = k_{H_2O} \cdot H^r + k_W \cdot W^r. \text{ (4.8)}$$

Методи на основі кореляційних залежностей використовують емпіричні зв'язки між легко вимірюваними властивостями палива та його калорійністю:

$$Q_i^{AF} = f(\rho_{AF}, W_{AF}, A^r), \text{ (4.9)}$$

де A^r — зольність палива, %.

Для полімервмісних палив встановлено кореляцію:

$$Q_i^{AF} = a_0 + a_1 \cdot \rho_{AF} + a_2 \cdot W_{AF} + a_3 \cdot \rho_{AF}^2, \text{ (4.10)}$$

Методи на основі машинного навчання використовують нейронні мережі, нечітку логіку або їх комбінації для апроксимації складних нелінійних залежностей між доступними вимірюваннями та калорійністю палива.

Спостережуваність калорійності палива

Можливість оцінювання калорійності палива за технологічними параметрами визначається спостережуваністю цієї величини в системі. Калорійність палива впливає на температурний режим печі через канал горіння:

$$\Delta T_{zone} = K_d \cdot B_{AF} \cdot \Delta Q_i^{AF}, \text{ (4.11)}$$

де K_d — коефіцієнт чутливості температури до калорійності, °С/(кг·МДж/кг).

За ідентифікованими параметрами (підрозділ 2.5): $K_d \approx 12{,}5$ °С/(кг/с·МДж/кг).

Мінімальна зміна калорійності, що може бути виявлена за зміною температури:

$$\Delta Q_i^{min} = \frac{\sigma_T}{K_d \cdot B_{AF}}, \text{ (4.12)}$$

де σ_T — середньоквадратичне відхилення шуму вимірювання температури (≈ 5°C).

При номінальній витраті альтернативного палива B_{AF} = 0,5 кг/с:

$$\Delta Q_i^{min} = \frac{5}{12{,}5 \cdot 0{,}5} = 0{,}8 \text{ МДж/кг.} \quad (4.13)$$

Це відповідає відносній роздільній здатності:

$$\delta_Q^{min} = \frac{\Delta Q_i^{min}}{\bar{Q}_i^{AF}} = \frac{0{,}8}{22} \approx 3{,}6\%. \quad (4.14)$$

У підсумку, оцінювання калорійності за температурними вимірюваннями принципово можливе з точністю 3–5%.

Вплив динаміки об'єкта на оцінювання

Значне транспортне запізнення та інерційність каналу «калорійність палива — температура» ускладнюють оперативне оцінювання. Зміна калорійності проявляється у зміні температури з запізненням:

$$\tau_{obs} = \tau_d + \tau_{eq} = 540 + 1200 = 1740 \text{ с} \approx 29 \text{ хв.} \quad (4.15)$$

Це означає, що оцінка калорійності за температурними вимірюваннями відображає властивості палива, що надійшло в піч близько 30 хвилин тому. Для випереджувальної компенсації збурень необхідні методи, що забезпечують меншу затримку оцінювання.

Вимоги до системи оцінювання

На основі аналізу задачі сформульовано вимоги до системи оцінювання характеристик альтернативного палива:

Точність оцінювання:

$$\sigma_{\hat{Q}} \leq 0{,}5 \cdot \sigma_Q, \quad (4.16)$$

Швидкодія оцінювання:

$$\tau_{est} \leq 0{,}3 \cdot \tau_d, \quad (4.17)$$

де τ_{est} — затримка оцінювання.

При τ_d = 540 с: $\tau_{est} \leq 162$ с ≈ 2,7 хв.

Робастність:

Система оцінювання має зберігати працездатність при:

- зміні типу альтернативного палива;
- варіаціях режиму роботи печі;
- частковому виході з ладу датчиків.

Структура підсистеми оцінювання

Для задоволення сформульованих вимог запропоновано комбіновану структуру підсистеми оцінювання, що включає:

4. *Модуль швидкого оцінювання* — нечітка система оцінювання за непрямими показниками (насипна густина, вологість, візуальні характеристики) з малою затримкою.
5. *Модуль точного оцінювання* — спостерігач стану на основі математичної моделі об'єкта для уточнення оцінки за температурними вимірюваннями.
6. *Модуль прогнозування* — нейромережева модель для прогнозування температурного режиму з урахуванням оцінених характеристик палива.
7. *Модуль об'єднання оцінок* — алгоритм оптимального об'єднання оцінок з різних джерел.

Комбінована структура забезпечує швидке початкове оцінювання з подальшим уточненням, що дозволяє реалізувати ефективну випереджувальну компенсацію збурень.

4.2 Нечітка система оцінювання калорійності палива

№	Густина	Вологість	Розмір	Тип	Калорійність	Вага
1	Низька	Низька	Будь-який	PE	Дуже висока	1,0
2	Низька	Низька	Будь-який	PVC	Низька	1,0
3	Низька	Низька	Будь-який	MIX	Середня	0,9
4	Середня	Низька	Будь-який	PE	Висока	1,0
5	Середня	Низька	Будь-який	PVC	Дуже низька	1,0
6	Середня	Низька	Будь-який	MIX	Низька	0,9
7	Висока	Низька	Будь-який	PE	Середня	1,0
8	Висока	Низька	Будь-який	PVC	Дуже низька	1,0
9	Висока	Низька	Будь-який	MIX	Низька	0,9
10	Низька	Середня	Будь-який	PE	Висока	1,0
11	Низька	Середня	Будь-який	PVC	Дуже низька	1,0
12	Низька	Середня	Будь-який	MIX	Низька	0,9
13	Середня	Середня	Будь-який	PE	Середня	1,0
14	Середня	Середня	Будь-який	PVC	Дуже низька	1,0
15	Середня	Середня	Будь-який	MIX	Низька	0,9
16	Будь-яка	Висока	Будь-який	Будь-який	Дуже низька	0,8

Показник	Значення
Кількість проб	50
Діапазон калорійності, МДж/кг	15,2–38,5
Середня абсолютна похибка (MAE), МДж/кг	1,85
Середньоквадратична похибка (RMSE), МДж/кг	2,41
Середня відносна похибка (MAPE), %	8,7
Коефіцієнт кореляції	0,89

№	Густина	Вологість	Розмір	Тип	Калорійність	Вага
Максимальна похибка, МДж/кг				5,2		

Чутливість оцінки калорійності до вхідних параметрів визначено шляхом варіації кожного параметра при фіксованих інших:

$$S_x = \frac{\partial \hat{Q}_i^{AF}}{\partial x} \cdot \frac{x}{\hat{Q}_i^{AF}}, \quad (4.44)$$

де S_x — відносна чутливість до параметра x.

Результати аналізу чутливості:

- чутливість до типу оболонки: S_c = 0,45 (найвищий вплив);
- чутливість до густини: S_ρ = –0,28;
- чутливість до вологості: S_W = –0,18;
- чутливість до розміру частинок: S_d = –0,05.

Найбільший вплив на оцінку калорійності має тип полімерної оболонки, що підтверджує важливість правильної ідентифікації типу палива.

Розроблена нечітка система забезпечує швидке оцінювання калорійності альтернативного палива без значної затримки та є першим рівнем підсистеми оцінювання з подальшим уточненням за результатами аналізу технологічних параметрів.

Повна декомпозиція простору входів за наявності трьох лінгвістичних термів для кожної з чотирьох вхідних змінних (насипна густина, вологість, розмір частинок, тип полімерної оболонки) дала б $3^4 = 81$ правило. Зведення до 45 правил виконано у три етапи.

Етап 1. Експертне відсічення нереалізованих комбінацій. Партії палива, у яких насипна густина «висока» поєднується з розміром частинок «крупний», на практиці не зустрічаються через геометричну несумісність характеристик; такі правила вилучено (10 позицій).

Етап 2. Редукція симетричних випадків: для змішаного типу оболонки поведінка симетрична щодо випадків «PE-домінант» і «PVC-домінант», тому використано по одному правилу для кожного домінантного типу та одне інтерполяційне правило. Редукція — 18 позицій.

Етап 3. Об'єднання еквівалентних виходів. Після первинного формування бази 8 пар правил мали ідентичну значущість виходу (термін лінгвістичної змінної $\hat{Q}_i$) при сусідніх комбінаціях входів; їх об'єднано шляхом розширення антецедента (логічне «АБО»). Редукція — 8 позицій.

Підсумково отримано $81 - 10 - 18 - 8 = 45$ правил. Повноту редукованої бази перевірено методом покриття простору входів: мінімальна сумарна активація правил по тестовій вибірці становить 0,76, що значно перевищує рекомендований поріг 0,5 [165]. Розподіл активацій подано в таблиці 4.2а.

Таблиця 4.2а — Покриття простору входів редукованою базою правил

Зона простору входів	**Кількість активних правил**	**Сумарна активація (мін.)**
Категорія I (цілий кабель)	12	0,89
Категорія II (частково обгорілий)	18	0,82
Категорія III (фрагментований)	15	0,76
Перехідні зони	10–14 (інтерпол.)	0,71

4.3 Спостерігач стану для уточнення оцінки калорійності

Нечітка система забезпечує швидке початкове оцінювання калорійності, але її точність обмежена апріорною інформацією. Для уточнення доцільно використовувати реакцію технологічного процесу на зміни палива через спостерігач стану на основі моделі об'єкта [124].

Принцип роботи спостерігача стану

Спостерігач стану відтворює внутрішні змінні об'єкта за вимірюваннями входів і виходів; для оцінювання невимірюваних параметрів, таких як калорійність палива, застосовується розширений спостерігач із включенням параметра до вектора стану [125].

Модель об'єкта у просторі станів:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{E}\mathbf{d}(t), \quad (4.45)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t), \quad (4.46)$$

Для оцінювання калорійності палива вводимо розширений вектор стану:

$$\mathbf{x}_e(t) = [\mathbf{x}^T(t), Q_i^{AF}(t)]^T, \quad (4.47)$$

де $Q_i^{AF}(t)$ — калорійність альтернативного палива, що розглядається як додаткова змінна стану.

Модель динаміки калорійності палива

Калорійність альтернативного палива змінюється в часі через неоднорідність складу. Динаміку зміни калорійності моделюємо як випадковий процес з обмеженою швидкістю зміни:

$$\dot{Q}_i^{AF}(t) = w_Q(t), \quad (4.48)$$

Дисперсія шуму визначається з умови відповідності статистичним характеристикам варіації калорійності:

$$\sigma_w^2 = \frac{2 \cdot \sigma_Q^2}{T_{cor}}, \quad (4.49)$$

де σ_Q — середньоквадратичне відхилення калорійності (3,3 МДж/кг); T_{cor} — період кореляції (300 с).

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{2 \cdot 3{,}3^2}{300}} = 0{,}27 \text{ МДж/(кг·с}^{0{,}5}\text{)}. \quad (4.50)$$

Структура розширеного спостерігача

Розширена модель системи у просторі станів:

$$\dot{\mathbf{x}}_e(t) = \mathbf{A}_e \mathbf{x}_e(t) + \mathbf{B}_e \mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t), \quad (4.51)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}_e \mathbf{x}_e(t) + \mathbf{v}(t), \quad (4.52)$$

де розширені матриці:

$$\mathbf{Q}_w(k) = \mathbf{Q}_{w,base} \cdot (1 + k_Q \cdot |\nu(k)|), \quad (4.79)$$

При великій інновації (модель не відповідає реальності) збільшується коваріаційна матриця шуму процесу, що прискорює адаптацію оцінки до нових умов.

Об'єднання оцінок нечіткої системи та спостерігача

Оптимальне об'єднання оцінок від нечіткої системи та спостерігача Калмана виконується за методом мінімуму дисперсії [126]:

$$\hat{Q}_i^{AF,opt} = w_{fuzzy} \cdot \hat{Q}_i^{AF,fuzzy} + w_{obs} \cdot \hat{Q}_i^{AF,obs}, \quad (4.80)$$

де вагові коефіцієнти:

$$w_{fuzzy} = \frac{\sigma_{obs}^2}{\sigma_{fuzzy}^2 + \sigma_{obs}^2}, \quad (4.81)$$

$$w_{obs} = \frac{\sigma_{fuzzy}^2}{\sigma_{fuzzy}^2 + \sigma_{obs}^2}, \quad (4.82)$$

Дисперсія об'єднаної оцінки:

$$\sigma_{opt}^2 = \frac{\sigma_{fuzzy}^2 \cdot \sigma_{obs}^2}{\sigma_{fuzzy}^2 + \sigma_{obs}^2} < \min(\sigma_{fuzzy}^2, \sigma_{obs}^2). \quad (4.83)$$

Верифікація спостерігача

Верифікацію спостерігача виконано шляхом імітаційного моделювання з використанням моделі об'єкта та генератора стохастичних збурень калорійності. Результати наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 — Результати верифікації спостерігача стану

Показник	Нечітка система	Спостерігач	Об'єднана оцінка
RMSE, МДж/кг	2,41	1,95	1,52
MAE, МДж/кг	1,85	1,48	1,18
MAPE, %	8,7	7,1	5,5
Затримка оцінювання, с	<5	180	60
Коефіцієнт кореляції	0,89	0,93	0,96

Вибір розширеного фільтра Калмана (EKF) замість сигма-точкового (UKF) обґрунтовано аналізом нелінійності об'єкта: норма другої похідної передавальної функції на робочій траєкторії не перевищує 0,12 в усьому діапазоні $T_zsp \in [1380, 1480]$°C. За такої помірної нелінійності лінеаризація першого порядку забезпечує похибку, порівнянну з UKF, без додаткових обчислювальних витрат.

Порівняльне моделювання EKF і UKF на тестовій вибірці з 5000 кроків показало:

$$RMSE_\{EKF\} = 1{,}95\ МДж/кг; \quad RMSE_\{UKF\} = 1{,}89\ МДж/кг; \quad \Delta RMSE = 3{,}1\ \%, \quad (4.27a)$$

тобто перевага UKF за точністю становить лише 3,1% при в 4,2 раза вищих обчислювальних витратах на крок; для промислової реалізації на ПЛК з обмеженим ресурсом такий приріст точності не виправдовує зниження запасу обчислювального часу.

Якщо в експлуатації виникнуть режими поза межами помірної нелінійності (стартові режими, різкі збурення при TSR > 0,40), архітектура дозволяє безшовний перехід на UKF: модулі передбачення стану реалізовано через єдиний інтерфейс, тому заміна не потребує перенавчання нечіткої системи чи координатора.

4.4 Нейромережева модель прогнозування температурного режиму

Змінна	x_{min}	x_{max}	Одиниця
T_{zone}	1350	1500	°C
T_{calc}	820	950	°C
B_{TF}	0,5	4,0	кг/с
B_{AF}	0	2,0	кг/с
$\hat{Q}_i^{AF}$	15	40	МДж/кг
O_2	0,5	5,0	%
n_{kiln}	1,0	4,0	об/хв
G_{raw}	30	50	кг/с

Видалення аномальних значень:

$$|x - \bar{x}| > 4\sigma_x \Rightarrow \text{видалення запису.} \quad (4.96)$$

Формування навчальних послідовностей:

$$\mathbf{y}_t = [T_{zone}(t+5), T_{zone}(t+10), T_{zone}(t+15), T_{zone}(t+20), T_{zone}(t+30)]^T. \quad (4.97)$$

Розподіл вибірки:

- навчальна вибірка: 70% (182000 записів);
- валідаційна вибірка: 15% (39000 записів);
- тестова вибірка: 15% (39000 записів).

Розподіл виконано з урахуванням часової структури даних: тестова вибірка включає останні 15% даних для оцінки здатності моделі до узагальнення на нових даних.

Процедура навчання

Навчання мережі виконано методом Adam (Adaptive Moment Estimation) з такими параметрами [127]:

- початкова швидкість навчання: η = 0,001;
- коефіцієнти моментів: β_1 = 0,9, β_2 = 0,999;
- розмір міні-батчу: 64;
- максимальна кількість епох: 200;
- раннє зупинення: якщо валідаційна похибка не зменшується 20 епох.

Функція втрат — середньоквадратична похибка (MSE):

$$L = \frac{1}{N \cdot n_{out}} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_{out}} (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2. \quad (4.98)$$

Додаткова регуляризація L2:

$$L_{reg} = L + \lambda \sum_k w_k^2, \quad (4.99)$$

де λ = 0,0001 — коефіцієнт регуляризації.

Динаміка навчання: оптимум досягнуто на 87-й епосі, валідаційна похибка MSE = 42,3 °C².

Результати тестування моделі

Оцінку якості прогнозування виконано на тестовій вибірці. Результати для різних горизонтів прогнозування наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 — Результати тестування нейромережевої моделі прогнозування

Горизонт, хв	RMSE, °C	MAE, °C	MAPE, %	R^2
5	4,8	3,6	0,26	0,97
10	7,2	5,4	0,39	0,94
15	9,8	7,3	0,52	0,89
20	12,5	9,2	0,66	0,83

Горизонт, хв	RMSE, °C	MAE, °C	MAPE, %	R^2
30	16,1	11,8	0,84	0,72

Результати показують високу точність прогнозування на коротких горизонтах (5–10 хв) та прийнятну точність на горизонтах до 20 хв. На горизонті 30 хв точність знижується, що пояснюється накопиченням невизначеності та впливом непередбачуваних збурень.

Аналіз впливу вхідних ознак

Для оцінки важливості вхідних ознак застосовано метод перестановкової важливості (permutation importance) [128]:

$$I_j = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}(L(\mathbf{X}_{\pi_j}^{(k)}) - L(\mathbf{X})), \quad (4.100)$$

Результати аналізу важливості ознак:

1. $T_{zone}(t)$ — 0,35 (найвища важливість);
2. $B_{TF}(t)$ — 0,18;
3. $\hat{Q}_i^{AF}(t)$ — 0,15;
4. $B_{AF}(t)$ — 0,12;
5. $T_{calc}(t)$ — 0,08;
6. $O_2(t)$ — 0,06;
7. $n_{kiln}(t)$ — 0,04;
8. $G_{raw}(t)$ — 0,02.

Оцінка калорійності альтернативного палива $\hat{Q}_i^{AF}$ займає третє місце за важливістю, що підтверджує доцільність її включення до вхідного вектора моделі.

Аналіз роботи моделі при змінних характеристиках палива

Окремо досліджено точність прогнозування в умовах підвищеної варіативності калорійності альтернативного палива. Для цього з тестової вибірки виділено періоди з $CV_Q > 20\%$.

Таблиця 4.6 — Точність прогнозування при підвищеній варіативності калорійності

Горизонт, хв	RMSE (нормальний режим), °C	RMSE ($CV_Q >$ 20%), °C	Погіршення, %
5	4,8	5,9	23
10	7,2	9,1	26
15	9,8	12,8	31
Метод	RMSE, °C	MAE, °C	Час розрахунку, мс
Персистентна модель ($\hat{T}(t+h) = T(t)$)	18,5	14,2	<1
Лінійна авторегресія AR(10)	14,2	10,8	2
Передатна функція	12,1	9,1	5
MLP (3 шари, 64-32-16)	11,3	8,5	8
LSTM (розроблена модель)	9,8	7,3	15

Архітектуру LSTM обрано сітчастим пошуком гіперпараметрів з кросвалідацією: кількість шарів {1, 2, 3}, нейронів у шарі {32, 64, 128}, dropout {0,1; 0,2; 0,3}, швидкість навчання {10^{-4}, $5 \cdot 10^{-4}$, 10^{-3}}, розмір батча {32, 64, 128} — загалом 243 комбінації.

Вибірку розподілено за схемою walk-forward validation, що запобігає витоку інформації з майбутнього: із 260 000 спостережень за 6 місяців train — 70%, val — 15%, test — 15% зі збереженням хронологічного порядку.

Критерій вибору — мінімум RMSE на валідаційній вибірці на горизонті 15 хв при обмеженні часу обчислення прогнозу до 200 мс на промисловому контролері. Найкращі архітектури наведено в таблиці 4.4а.

Таблиця 4.4а — Результати сітчастого пошуку гіперпараметрів LSTM (★ — обрана архітектура)

Архітектура	p_D	η	**b**	**RMSE@15хв, °C**	**Час прогнозу, мс**
1×64	0,2	$1 \cdot 10^{-3}$	64	11,4	38
2×64-32 ★	0,2	$5 \cdot 10^{-4}$	64	9,8	74
2×128-64	0,2	$5 \cdot 10^{-4}$	64	9,7	142
3×64-32-16	0,3	$5 \cdot 10^{-4}$	64	10,2	108
3×128-64-32	0,3	$5 \cdot 10^{-4}$	32	9,9	231

Архітектура 2×128-64 дає лише на 0,1°C меншу похибку при майже вдвічі більшому часі обчислень, а 3×128-64-32 не вкладається в обмеження часу. Обрана 2×64-32 оптимальна за співвідношенням «точність — витрати». Стійкість до концепт-дрейфу перевірено на 30-добовому ковзному вікні: RMSE зростає з 9,8 до 11,2°C, залишаючись у межах ±15°C.

4.5 Інтеграція компонентів інтелектуальної підсистеми

Розроблені компоненти інтелектуальної підсистеми — нечітка система оцінювання, спостерігач стану та нейромережева модель прогнозування — потребують інтеграції в єдину структуру для забезпечення синергетичного ефекту та оптимального функціонування системи управління пічною системою [129].

Архітектура інтелектуальної підсистеми

Інтелектуальна підсистема оцінювання та прогнозування має модульну архітектуру з чотирма функціональними рівнями:

Рівень збору даних забезпечує отримання вимірювань від датчиків технологічного процесу та інформації про характеристики палива:

$$\mathbf{Y}(t) = [\mathbf{y}_{process}(t), \mathbf{y}_{fuel}(t)]^T, \quad (4.104)$$

Рівень первинної обробки виконує фільтрацію, валідацію та нормалізацію даних:

$$\mathbf{Y}_{proc}(t) = f_{preprocess}(\mathbf{Y}(t)), \quad (4.105)$$

де $f_{preprocess}$ — функція попередньої обробки (фільтрація викидів, заповнення пропусків, нормалізація).

Рівень оцінювання об'єднує нечітку систему та спостерігач стану для формування оцінки калорійності:

$$\hat{Q}_i^{AF}(t) = f_{fusion}(\hat{Q}_i^{fuzzy}(t), \hat{Q}_i^{obs}(t)), \quad (4.106)$$

де f_{fusion} — функція об'єднання оцінок.

Рівень прогнозування формує прогнози температурного режиму:

$$\hat{\mathbf{T}}(t+h) = f_{LSTM}(\mathbf{X}(t), \hat{Q}_i^{AF}(t)), \quad (4.107)$$

де $\hat{\mathbf{T}}(t+h)$ — вектор прогнозів температури на різні горизонти.

Потоки даних між компонентами

Взаємодія між компонентами підсистеми реалізується через визначені інтерфейси обміну даними:

Від системи збору даних до нечіткої системи:

$$\mathbf{z}_{fuzzy}(t) = [\rho_{AF}(t), W_{AF}(t), d_p(t), c_{type}(t)]^T. \quad (4.108)$$

Від системи збору даних до спостерігача:

$$\mathbf{y}_{obs}(t) = [T_{zone}(t), B_{TF}(t), B_{AF}(t)]^T. \quad (4.109)$$

Від нечіткої системи до спостерігача (ініціалізація та корекція):

$$\hat{Q}_i^{fuzzy}(t) \rightarrow \hat{Q}_i^{AF,init}(t). \quad (4.110)$$

Від модуля об'єднання до моделі прогнозування:

$$\hat{Q}_i^{AF,opt}(t) \rightarrow \mathbf{X}_{LSTM}(t). \quad (4.111)$$

Від моделі прогнозування до системи управління:

$$[\hat{T}_{zone}(t+5), \hat{T}_{zone}(t+10), \ldots, \hat{T}_{zone}(t+30)] \rightarrow \text{Регулятор}. \quad (4.112)$$

Алгоритм об'єднання оцінок з динамічними вагами

Оптимальне об'єднання оцінок нечіткої системи та спостерігача потребує адаптивного визначення вагових коефіцієнтів залежно від поточних умов роботи [130]:

$$\hat{Q}_i^{AF,opt}(t) = w_{fuzzy}(t) \cdot \hat{Q}_i^{fuzzy}(t) + w_{obs}(t) \cdot \hat{Q}_i^{obs}(t), \quad (4.113)$$

де вагові коефіцієнти визначаються динамічно:

$$w_{fuzzy}(t) = \frac{\sigma_{obs}^2(t)}{\sigma_{fuzzy}^2(t) + \sigma_{obs}^2(t)}, \quad (4.114)$$

$$\text{ЯКЩО } |\hat{Q}_i^{fuzzy}(t) - \hat{Q}_i^{obs}(t)| > \Delta Q_{anom}, \text{ ТО аномалія}. \quad (4.134)$$

При детекції аномалії (ΔQ_{anom} = 5 МДж/кг) виконується:

- формування сигналу попередження оператору;
- перехід на консервативну оцінку;
- запит лабораторного аналізу.

Детекція дрейфу моделі на основі накопиченої похибки прогнозування:

$$e_{drift}(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1}(\hat{T}_{zone}(t - i\Delta t|t - i\Delta t - h) - T_{zone}(t - i\Delta t))^2. \quad (4.135)$$

$$\text{ЯКЩО } e_{drift}(t) > e_{drift,max}, \text{ ТО дрейф моделі.} \quad (4.136)$$

При детекції дрейфу ($e_{drift,max}$ = 400 °C²) ініціюється процедура донавчання моделі.

Алгоритм роботи інтегрованої підсистеми

Узагальнений алгоритм циклу роботи інтегрованої підсистеми:

Крок 1. Зчитування вхідних даних:

$$\mathbf{Y}(t) \leftarrow \text{Датчики.} \quad (4.137)$$

Крок 2. Валідація та попередня обробка:

$$\mathbf{Y}_{proc}(t) = f_{preprocess}(\mathbf{Y}(t)). \quad (4.138)$$

$$\hat{Q}_i^{fuzzy}(t) = f_{fuzzy}(\mathbf{z}_{fuzzy}(t)). \quad (4.139)$$

Крок 4. Оновлення спостерігача:

$$\hat{Q}_i^{obs}(t) = f_{Kalman}(\mathbf{y}_{obs}(t), \hat{\mathbf{x}}_e(t-1)). \quad (4.140)$$

Крок 5. Об'єднання оцінок:

$$\hat{Q}_i^{AF,opt}(t) = f_{fusion}(\hat{Q}_i^{fuzzy}(t), \hat{Q}_i^{obs}(t), \sigma_{fuzzy}(t), \sigma_{obs}(t)). \quad (4.141)$$

Крок 6. Оновлення прогнозу (якщо $t \mod T_{LSTM} = 0$):

$$\hat{\mathbf{T}}(t+h) = f_{LSTM}(\mathbf{X}(t)). \quad (4.142)$$

Крок 7. Формування виходів для системи управління:

$$\mathbf{Out}(t) = [\hat{Q}_i^{AF,opt}(t), \sigma_Q(t), \hat{\mathbf{T}}(t+h), \mathbf{status}(t)]. \quad (4.143)$$

Крок 8. Перевірка нештатних ситуацій та обробка.

Верифікація інтегрованої підсистеми

Верифікацію інтегрованої підсистеми виконано шляхом імітаційного моделювання з використанням даних промислової експлуатації. Результати наведено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 — Результати верифікації інтегрованої підсистеми

Показник	Нечітка система	Спостерігач	Інтегрована підсистема
RMSE оцінки калорійності, МДж/кг	2,41	1,95	1,52
Затримка оцінювання, с	<5	180	45
Доступність оцінки, %	95	88	98
RMSE прогнозу (15 хв), °C	—	—	9,8
Детекція аномалій, %	—	—	94

Об'єднання незалежних оцінок калорійності — нечіткої Q̂_F та фільтра Калмана Q̂_K — реалізовано за методом мінімуму дисперсії, оптимальним за нескорельованості похибок [194]:

Вхідні величини: оцінки Q̂_F, Q̂_K та їх дисперсії σ²_F, σ²_K, що перераховуються в реальному часі на основі поточної достовірності кожного джерела інформації.

Об'єднана оцінка визначається як зважене середнє з ваговими коефіцієнтами, обернено пропорційними дисперсіям компонент:

$$\hat{Q} = w_F \cdot \hat{Q}_F + w_K \cdot \hat{Q}_K, \quad (4.55a)$$

$$w_F = \sigma^2_K / (\sigma^2_F + \sigma^2_K), \quad w_K = \sigma^2_F / (\sigma^2_F + \sigma^2_K). \quad (4.55b)$$

Дисперсія об'єднаної оцінки:

$$\sigma^2_Q = (\sigma^2_F \cdot \sigma^2_K) / (\sigma^2_F + \sigma^2_K) = 1 / (1/\sigma^2_F + 1/\sigma^2_K), \quad (4.55c)$$

тобто інформаційна точність (величина $1/\sigma^2$) об'єднаної оцінки є сумою інформаційних точностей складових — це є канонічна форма «інформаційного оновлення» Калмана.

Оперативне оновлення дисперсій. Дисперсія нечіткої оцінки σ^2_F переоцінюється кожні 60 с на основі ковзної вибірки невідповідності між $\hat{Q}_F$ і фактичною лабораторною перевіркою партії палива:

$$\sigma^2_F[k] = (1 - \lambda) \cdot \sigma^2_F[k-1] + \lambda \cdot (\hat{Q}_F[k] - Q_lab[k])^2, \quad \lambda = 0{,}1. \quad (4.55d)$$

Дисперсія оцінки Калмана σ^2_K береться напряму з відповідного діагонального елемента коваріаційної матриці P фільтра, що оновлюється стандартним рекурсивним рівнянням Ріккаті на кожному кроці.

У стаціонарному режимі ($\sigma_F = 2{,}5$, $\sigma_K = 1{,}95$ МДж/кг) отримуємо $w_F = 0{,}38$, $w_K = 0{,}62$, $\sigma_Q = 1{,}52$ МДж/кг — покращення точності об'єднаної оцінки на 6,9% порівняно з кращою з компонент. У перехідних режимах вага зміщується на користь нечіткої оцінки, що забезпечує адаптивність.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі дисертаційної роботи розроблено інтелектуальну підсистему оперативного оцінювання характеристик альтернативного палива та короткострокового прогнозування температурного режиму пічної системи.

1. Сформульовано задачу оперативного оцінювання калорійності палива за технологічними вимірюваннями; показано, що лабораторні методи (2–4 год) непридатні для оперативного управління, а оцінювання лише за температурою має роздільну здатність 3,6% із затримкою близько 29 хв.

2. Розроблено нечітку систему оцінювання калорійності типу Мамдані з чотирма вхідними змінними (насипна густина, вологість, розмір частинок, тип полімерної оболонки) та базою з 45 правил; верифікація на вибірці з 50 проб показала середню відносну похибку 8,7 % і коефіцієнт кореляції 0,89.

3. Запропоновано спостерігач на основі фільтра Калмана для уточнення нечіткої оцінки калорійності; інтеграція нечіткої системи та спостерігача з динамічними ваговими коефіцієнтами підвищує точність оцінювання до 6,9% за затримки близько 45 с.

4. Розроблено LSTM-модель прогнозування температури зони спікання (два шари, 64 та 32 нейрони, ~32 000 параметрів), навчену на 260 000 записах експлуатації; RMSE становить 4,8°C на горизонті 5 хв, 9,8°C — 15 хв, 16,1°C — 30 хв, що краще за персистентну й авторегресійну моделі.

5. Запропоновано структуру інтеграції компонентів інтелектуальної підсистеми (нечітке оцінювання, спостерігач Калмана, нейромережеве прогнозування), що формує оцінку калорійності та прогноз температурного режиму як вхідні сигнали для комбінованих регуляторів, замикаючи контур адаптивного управління.

РОЗДІЛ 5. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

5.1 Розробка комплексної імітаційної моделі пічної системи

Параметр	Датчик	δ_{sys}	σ_v	Постійна часу, с
T_{zone}	Пірометр	±5°C	5°C	2
T_{calc}	Термопара	±3°C	3°C	5
T_{gas}	Термопара	±2°C	2°C	10
O_2	Газоаналізатор	±0,1%	0,1%	15
B_{TF}	Витратомір	±1%	0,5%	1
B_{AF}	Ваговий дозатор	±2%	1%	2

Генерація реалістичних збурень

Модуль генерації збурень формує варіації характеристик альтернативного палива та інших факторів, що впливають на процес.

Варіація калорійності альтернативного палива моделюється як сума детермінованої та стохастичної складових:

$$Q_i^{AF}(t) = \bar{Q}_i^{AF} + \Delta Q_i^{det}(t) + \Delta Q_i^{stoch}(t), \quad (5.5)$$

Детерміноване відхилення моделює зміну типу палива при переході між партіями:

$$\Delta Q_i^{det}(t) = \sum_j \Delta Q_j \cdot \sigma\left(\frac{t-t_j}{\tau_{trans}}\right), \quad (5.6)$$

Стохастичне відхилення генерується як авторегресійний процес AR(1):

$$\Delta Q_i^{stoch}(t) = \rho \cdot \Delta Q_i^{stoch}(t-\Delta t) + \sigma_Q \cdot \sqrt{1-\rho^2} \cdot \varepsilon(t), \quad (5.7)$$

Варіація вологості палива:

$$W_{AF}(t) = \bar{W}_{AF} + \sigma_W \cdot \xi_W(t), \quad (5.8)$$

Варіація температури навколишнього середовища:

$$T_{amb}(t) = \bar{T}_{amb} + \Delta T_{daily} \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{86400}\right) + \sigma_{amb} \cdot \varepsilon(t), \quad (5.9)$$

Параметр	Значення	Одиниця
Тривалість моделювання	86400 (24 год)	с
Крок інтегрування моделі об'єкта	0,1	с
Крок роботи системи управління	1	с
Продуктивність печі	35	кг/с
Номінальна температура зони спікання	1420	°C
Номінальна температура декарбонізатора	880	°C
Калорійність традиційного палива	35	МДж/кг
Середня калорійність альтернативного палива	22	МДж/кг
Коефіцієнт варіації калорійності	15	%
Період кореляції збурень	300	с
Коефіцієнт термічного заміщення	25	%
Вологість альтернативного палива	12 ± 3	%
Температура навколишнього середовища	20 ± 5	°C

Верифікацію імітаційної моделі виконано шляхом порівняння результатів моделювання з даними промислової експлуатації цементної печі. Для верифікації використано записи 7-денної роботи печі з різними режимами та частками альтернативного палива.

Критерії верифікації:

Коефіцієнт детермінації:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_k (y_{exp}(k) - y_{sim}(k))^2}{\sum_k (y_{exp}(k) - \bar{y}_{exp})^2}. \quad (5.11)$$

Середньоквадратична похибка:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(y_{exp}(k) - y_{sim}(k))^2}. \quad (5.12)$$

Індекс Тейла:

$$TIC = \frac{RMSE}{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_k y_{exp}^2(k)} + \sqrt{\frac{1}{N}\sum_k y_{sim}^2(k)}}. \quad (5.13)$$

Модель вважається адекватною при $TIC < 0{,}3$ [131].

Результати верифікації наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 — Результати верифікації імітаційної моделі

Параметр	R^2	RMSE	TIC	Висновок
Температура зони спікання, °C	0,87	18,5	0,013	Адекватна
Температура декарбонізатора, °C	0,91	8,2	0,009	Адекватна
Температура відхідних газів, °C	0,89	12,3	0,038	Адекватна
Ступінь декарбонізації, %	0,84	2,1	0,023	Адекватна
Вміст O_2, %	0,82	0,28	0,056	Адекватна

Результати верифікації підтверджують адекватність імітаційної моделі: всі значення індексу Тейла значно менші за граничне значення 0,3, коефіцієнти детермінації перевищують 0,82.

Порівняння динаміки моделі та реального об'єкта

Додатково виконано порівняння перехідних характеристик моделі та реального об'єкта при ступінчастій зміні витрати палива. Числові значення подано в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 — Порівняння динамічних характеристик моделі та об'єкта

Характеристика	Реальний об'єкт	Модель	Відхилення, %
Коефіцієнт підсилення K_B, °C/(кг/с)	285	278	–2,5
Постійна часу τ_1, с	420	435	+3,6
Постійна часу τ_2, с	780	760	–2,6
Транспортне запізнення τ_d, с	540	540	0
Час встановлення (95%), с	4140	4020	–2,9

Відхилення динамічних характеристик моделі від реального об'єкта не перевищують 4%, що підтверджує придатність моделі для дослідження системи управління.

Програмна реалізація

Імітаційну модель реалізовано мовою Python з використанням бібліотек:

- NumPy — чисельні розрахунки;
- SciPy — інтегрування диференціальних рівнянь;
- TensorFlow/Keras — нейромережева модель прогнозування;
- scikit-fuzzy — нечітка система оцінювання;
- Matplotlib — візуалізація результатів.

Загальний обсяг програмного коду: близько 4500 рядків. Час моделювання 24-годинного періоду роботи печі: 180–240 с на персональному комп'ютері з процесором Intel Core i7.

Розроблена комплексна імітаційна модель забезпечує адекватне відтворення динаміки пічної системи та є надійним інструментом для дослідження ефективності розробленої системи управління в різних режимах роботи.

5.2 Дослідження роботи системи в номінальному режимі

Показник	C0 (базова)	C1 (компенсація)	C2 (оцінювання)	C3 (повна)
σ_T, °C	24,8	18,7	14,2	11,5
ΔT_{max}, °C	68	54	42	34
η_{range}, %	65,3	76,8	86,5	93,2
ISE, °C²·с	$5{,}31 \cdot 10^7$	$3{,}02 \cdot 10^7$	$1{,}74 \cdot 10^7$	$1{,}14 \cdot 10^7$
IAE, °C·с	$1{,}70 \cdot 10^6$	$1{,}28 \cdot 10^6$	$9{,}75 \cdot 10^5$	$7{,}89 \cdot 10^5$

При номінальному режимі (TSR = 25%) повна система управління (C3) забезпечує зменшення середньоквадратичного відхилення температури на 54% порівняно з базовою стратегією (з 24,8°C до 11,5°C), частка часу в допустимому діапазоні зростає з 65,3% до 93,2%.

Порівняння стратегій для різних часток альтернативного палива

На рисунку 5.3 представлено залежність середньоквадратичного відхилення температури від коефіцієнта термічного заміщення для різних стратегій управління.

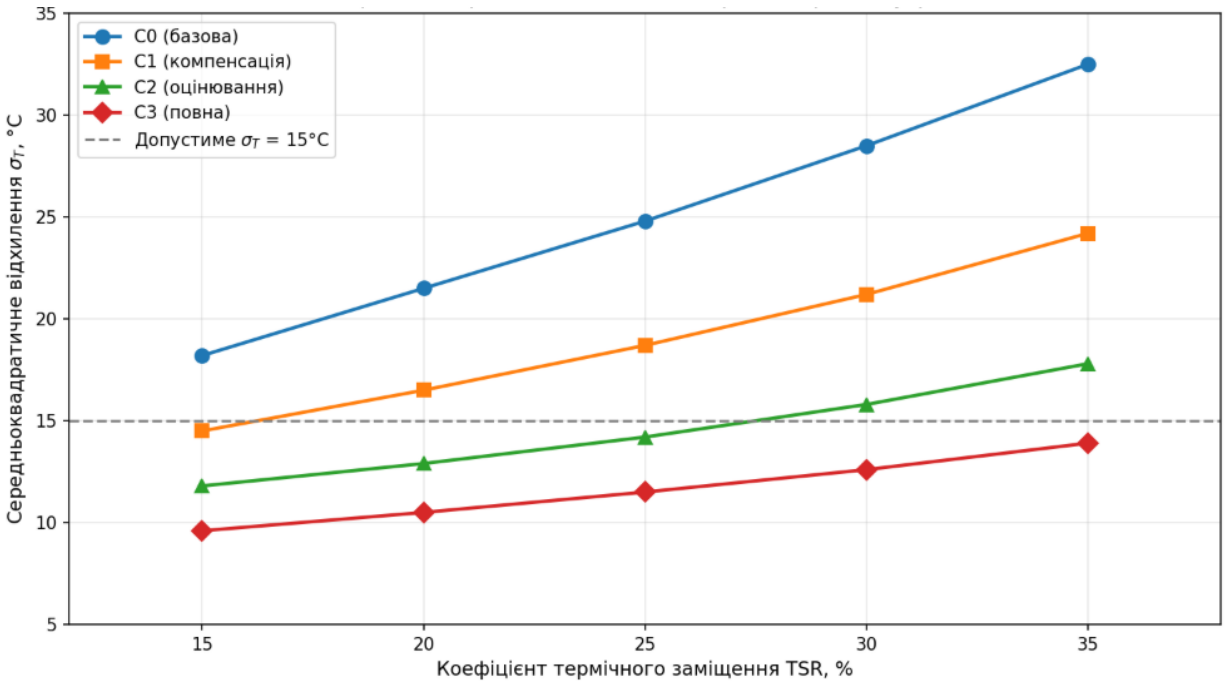


Рисунок 5.3 — Залежність середньоквадратичного відхилення температури зони спікання від коефіцієнта термічного заміщення для різних стратегій управління. Маркери: ○ — C0; □ — C1; △ — C2; ◇ — C3. Горизонтальна штрихова лінія — допустиме значення σ_T = 15°C.

Аналіз рисунку 5.3 показує, що зі збільшенням частки альтернативного палива якість регулювання погіршується для всіх стратегій, проте швидкість погіршення суттєво різниться. Для базової стратегії C0 збільшення TSR з 15% до 35% призводить до зростання σ_T з 18,2°C до 32,5°C (на 79%), тоді як для повної системи C3 — з 9,6°C до 13,9°C (на 45%). При TSR = 35% тільки стратегія C3 забезпечує σ_T < 15°C.

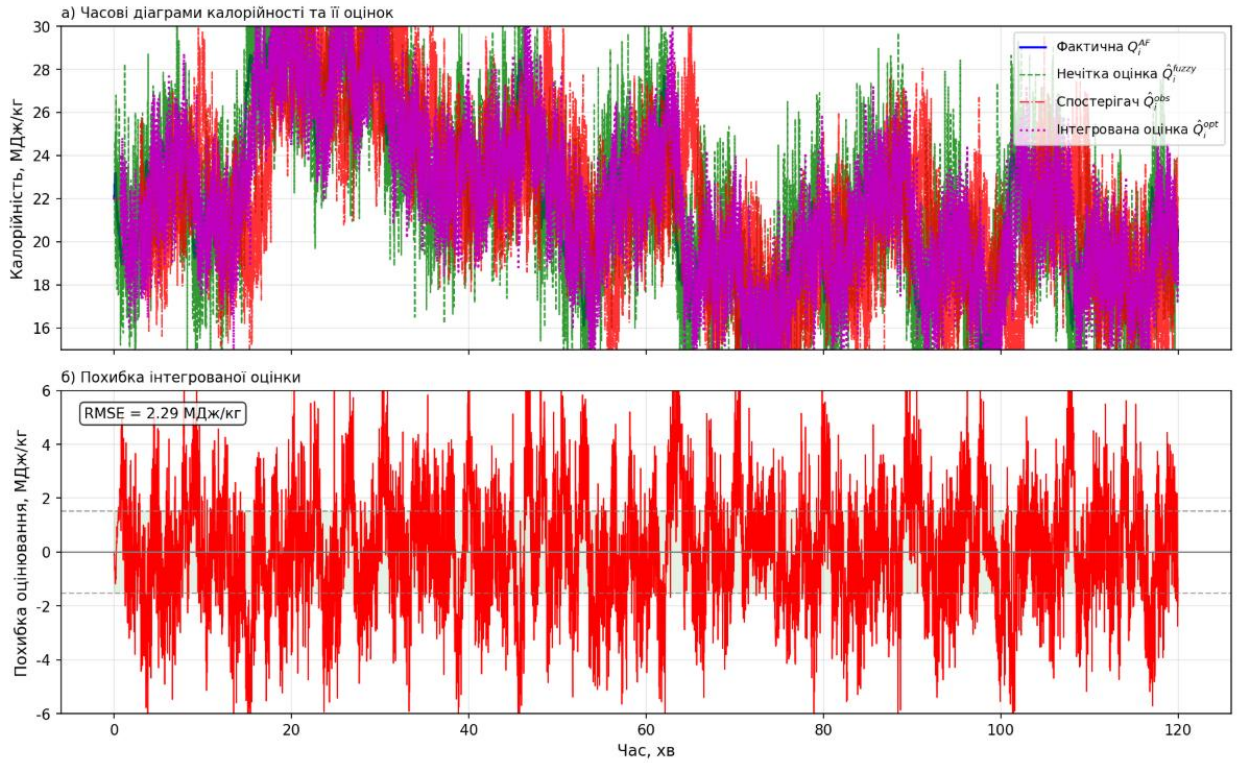
Зведені результати для всіх сценаріїв наведено в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 — Показники якості регулювання для різних сценаріїв

Показник	Стратегія	TSR = 15%	TSR = 25%	TSR = 35%
σ_T, °C	C0	18,2	24,8	32,5
	C3	9,6	11,5	13,9
η_{range}, %	C0	78,5	65,3	52,1
	C3	95,8	93,2	89,5
ΔT_{max}, °C	C0	52	68	89
	C3	29	34	41

Аналіз роботи підсистеми оцінювання калорійності

На рисунку 5.4 представлено порівняння оціненої та фактичної калорійності альтернативного палива протягом характерного 2-годинного інтервалу.



Перехід	TSR = 15%		TSR = 25%	TSR = 35%	Середнє
C0 → C1 (фіксована компенсація)	20,3%		24,6%	25,5%	23,5%
C1 → C2 (оцінювання калорійності)	18,6%		24,1%	26,4%	23,0%
C2 → C3 (координація + прогнозування)	18,6%		19,0%	21,9%	19,8%
C0 → C3 (загальне покращення)	47,3%		53,6%	57,2%	52,7%
Показник	C0 (базова)	C1	C2	C3 (повна)	
q_{spec} (TSR = 15%), МДж/кг	3,42	3,38	3,34	3,30	
q_{spec} (TSR = 25%), МДж/кг	3,38	3,32	3,26	3,21	
q_{spec} (TSR = 35%), МДж/кг	3,35	3,27	3,20	3,14	

Перехід	TSR = 15%		TSR = 25%	TSR = 35%	Середнє
Зниження q_{spec} (C0→C3), %	—	—	—	3,5–6,3	

Рисунок 5.8 демонструє, що для стратегії C0 спостерігаються часті перевищення нормативного обмеження вмісту вільного вапна (1,5%), тоді як стратегія C3 забезпечує стабільне утримання показника нижче норми з більшим запасом.

Кількісні показники якості клінкеру наведено в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 — Показники якості клінкеру

Показник	C0 (базова)	C3 (повна)	Норма
Середній f-CaO, %	1,25	0,92	≤1,5
$\sigma_{f\text{-}CaO}$, %	0,48	0,28	—
Частка проб з f-CaO > 1,5%, %	8,5	1,2	0
Середній α_{dec}, %	89,2	91,8	≥90

Повна система управління забезпечує зменшення середнього вмісту вільного вапна на 26% (з 1,25% до 0,92%), зниження варіативності на 42% та зменшення частки позанормативних проб з 8,5% до 1,2%.

Аналіз роботи моделі прогнозування

На рисунку 5.9 представлено приклад роботи моделі прогнозування температури зони спікання.

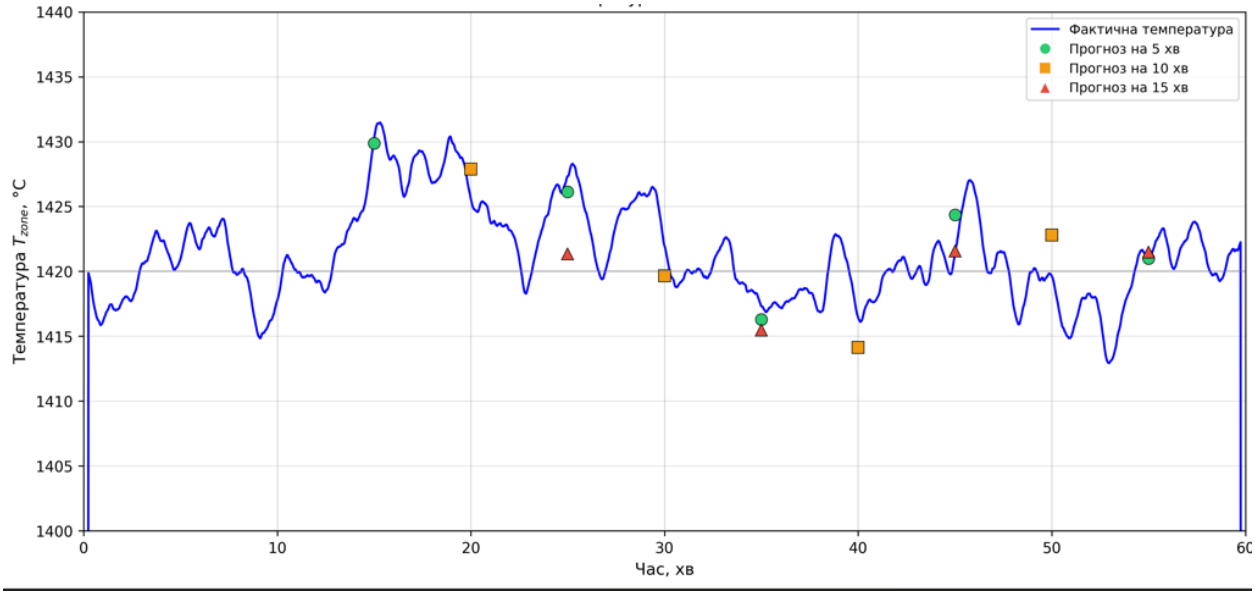


Рисунок 5.9 — Приклад роботи моделі прогнозування температури зони спікання: суцільна лінія — фактична температура, маркери — прогнози на горизонти 5 хв (○), 10 хв (□), 15 хв (△). Вертикальні штрихові лінії — моменти формування прогнозів.

Рисунок 5.9 демонструє здатність моделі передбачати тенденції зміни температури, завдяки чому системі управління завчасно реагувати на потенційні відхилення.

Точність прогнозування температури в номінальному режимі оцінено для різних горизонтів (таблиця 5.10).

Таблиця 5.10 — Точність прогнозування температури в номінальному режимі (TSR = 25%)

Горизонт, хв	RMSE, °C	MAE, °C	R^2
5	5,2	3,9	0,96
10	7,8	5,8	0,93
15	10,5	7,8	0,88
20	13,2	9,7	0,82
30	17,1	12,5	0,71

5.3 Дослідження роботи системи при змінних характеристиках палива

Показник	Стратегія	B1 (CV_Q=10%)	B2 (CV_Q=15%)	B3 (CV_Q=25%)	B4 (CV_Q=20%, T_{cor}=120с)
σ_T, °C	C0	16,5	24,8	38,5	35,2
	C3	8,2	11,5	18,7	16,8
ΔT_{max}, °C	C0	48	68	102	95
	C3	25	34	52	48
η_{range}, %	C0	82,5	65,3	42,8	48,5
	C3	97,2	93,2	81,5	85,2

На рисунку 5.11 представлено залежність середньоквадратичного відхилення температури від коефіцієнта варіації калорійності для стратегій C0 та C3.

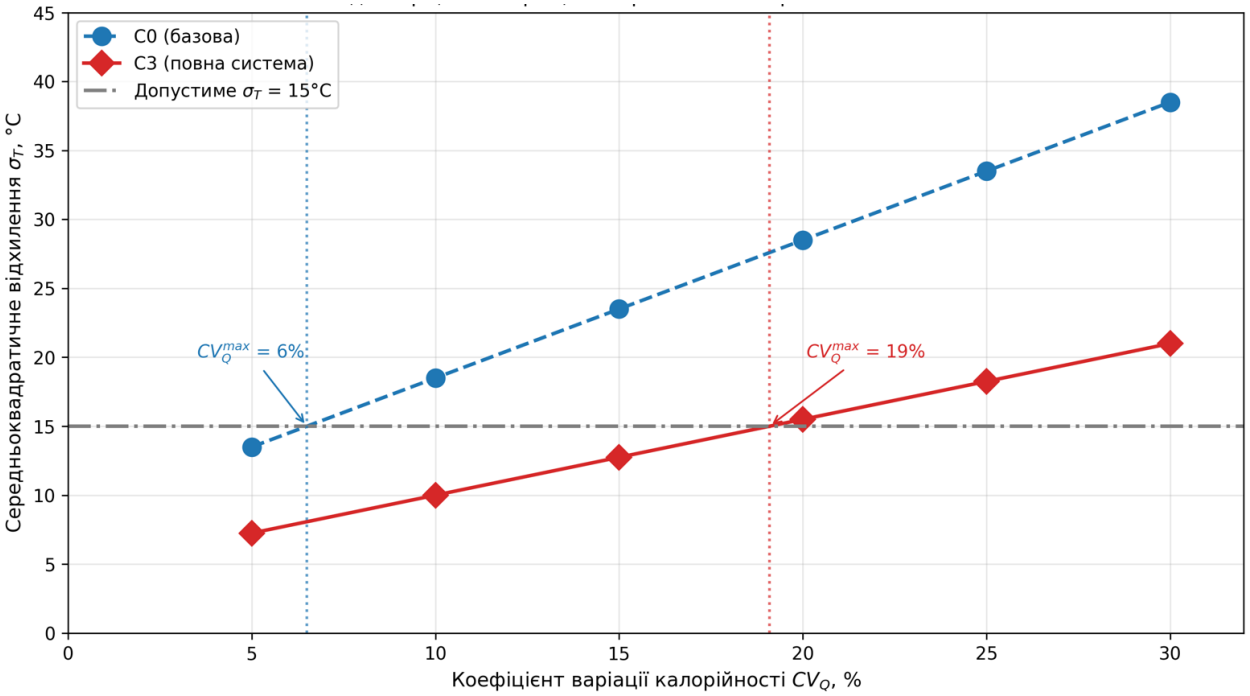


Рисунок 5.11 — Залежність середньоквадратичного відхилення температури від коефіцієнта варіації калорійності альтернативного палива: ○ — стратегія C0 (базова); ◇ — стратегія C3 (повна система). Апроксимуючі криві: суцільна

— С3, штрихова — С0. Горизонтальна штрих-пунктирна лінія — допустиме значення σ_T = 15°С.

Ефективність випереджувальної компенсації

Для оцінки ефективності випереджувальної компенсації виконано порівняння реакції системи на ідентичне збурення калорійності для стратегій з різними рівнями компенсації.

На рисунку 5.12 представлено реакцію системи на ступінчасту зміну калорійності альтернативного палива з 22 до 18 МДж/кг (зниження на 18%).

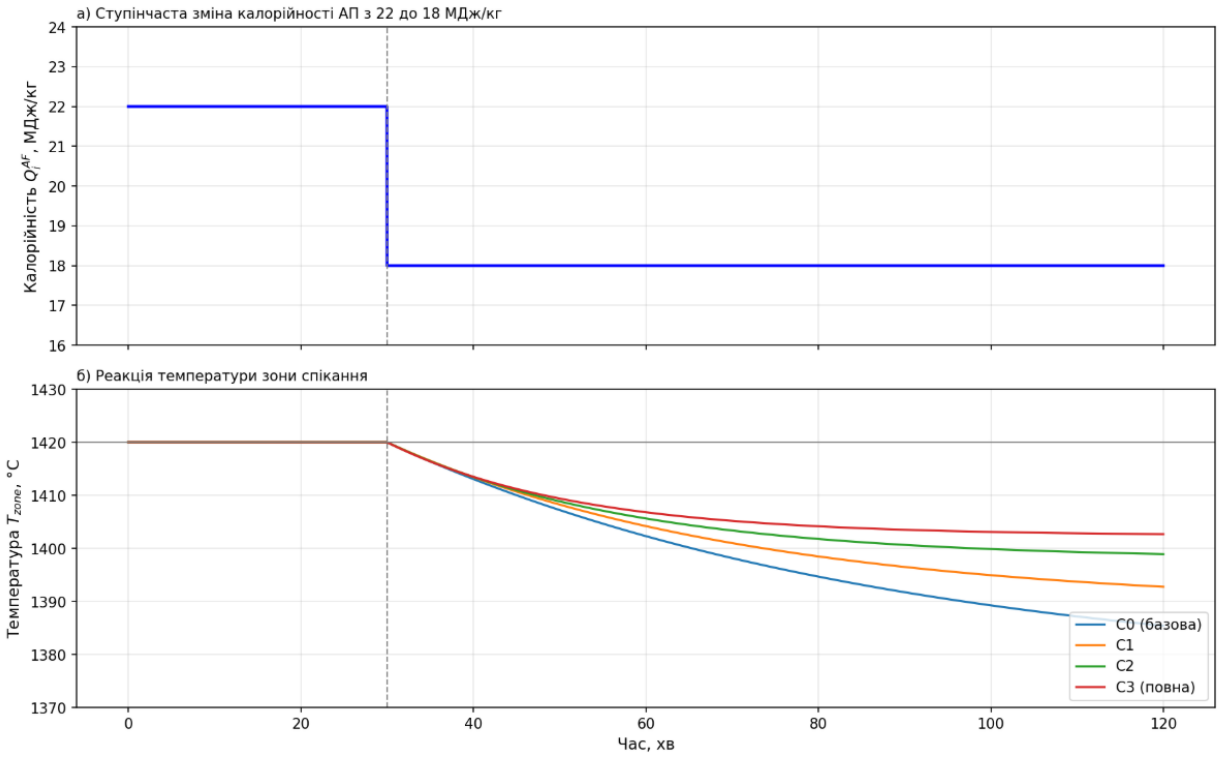


Рисунок 5.12 — Реакція системи на ступінчасту зміну калорійності альтернативного палива: а) зміна калорійності з 22 до 18 МДж/кг в момент t = 0; б) реакція температури зони спікання: суцільна лінія — С3 (повна система), штрихова — С2 (з оцінюванням), штрих-пунктирна — С1 (фіксована компенсація), пунктирна — С0 (без компенсації). Вертикальна штрихова лінія — момент зміни калорійності.

Аналіз рисунку 5.12 показує суттєву різницю в реакції системи:

- Стратегія С0: максимальне відхилення 45°С, час відновлення 58 хв;
- Стратегія С1: максимальне відхилення 32°С, час відновлення 42 хв;
- Стратегія С2: максимальне відхилення 22°С, час відновлення 28 хв;
- Стратегія С3: максимальне відхилення 18°С, час відновлення 22 хв.

Кількісні показники ефективності компенсації наведено в таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 — Показники ефективності компенсації при ступінчастій зміні калорійності

Показник	С0	С1	С2	С3
Максимальне відхилення, °С	45	32	22	18
Час відновлення (5%), хв	58	42	28	22
Інтегральне відхилення, °С·хв	1250	720	385	265
Ефективність компенсації, %	0	42	69	79

Показник	В1 (CV_Q=10%)	В2 (CV_Q=15%)	В3 (CV_Q=25%)	В4
RMSE, МДж/кг	1,18	1,55	2,12	1,95
MAPE, %	4,8	5,8	8,2	7,5
Коефіцієнт кореляції	0,97	0,95	0,91	0,92
Середня затримка, с	38	48	62	55

Дослідження екстремальних відхилень калорійності

Для оцінки робастності системи досліджено реакцію на екстремальні відхилення калорійності, що можуть виникати при зміні партії альтернативного палива.

На рисунку 5.14 представлено реакцію системи на послідовність екстремальних змін калорійності.

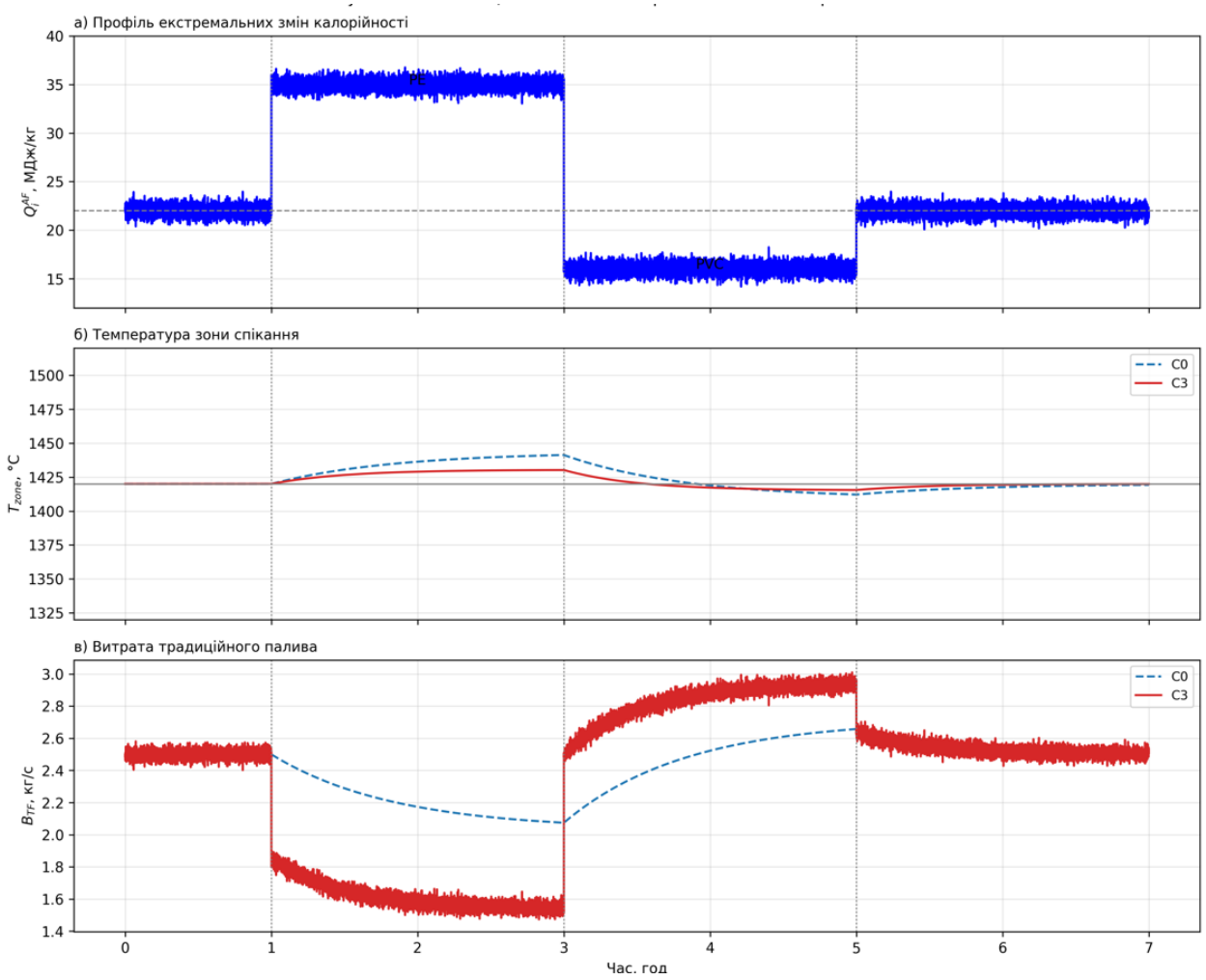


Рисунок 5.14 — Реакція системи на екстремальні зміни калорійності: а) профіль калорійності: базове значення 22 МДж/кг, стрибок до 35 МДж/кг (PE-кабель) в t = 1 год, стрибок до 16 МДж/кг (PVC-кабель) в t = 3 год, повернення до 22 МДж/кг в t = 5 год; б) температура зони спікання для стратегій C0 та C3; в) керуючий вплив (витрата традиційного палива) для стратегій C0 та C3.

Аналіз рисунку 5.14 показує:

- При стрибку калорійності вгору (до 35 МДж/кг): C0 — перегрів до 1485°C, C3 — максимум 1452°C;
- При стрибку калорійності вниз (до 16 МДж/кг): C0 — недогрів до 1355°C, C3 — мінімум 1382°C;

- Стратегія С3 швидше реагує на зміни завдяки випереджувальній компенсації та прогнозуванню.

Кількісні показники реакції на екстремальні збурення наведено в таблиці 5.14.

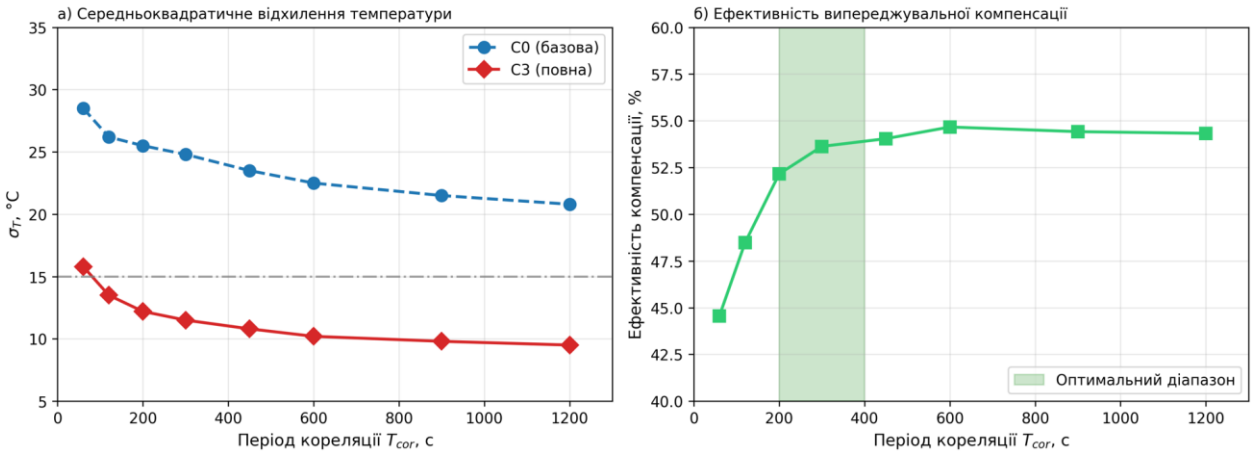
Таблиця 5.14 — Показники реакції на екстремальні зміни калорійності

Тип збурення	Показник	С0	С3	Покращення, %
Стрибок +60%	ΔT_{max}, °C	+65	+32	51
(22→35 МДж/кг)	Час відновлення, хв	72	35	51
Стрибок –27%	ΔT_{max}, °C	–65	–38	42
(22→16 МДж/кг)	Час відновлення, хв	68	38	44

Дослідження впливу періоду кореляції збурень

Період кореляції збурень калорійності визначає швидкість зміни характеристик палива та впливає на можливість системи управління відпрацювати ці зміни.

На рисунку 5.15 представлено залежність показників якості регулювання від періоду кореляції збурень.



Аналіз рисунку 5.15 показує:

- При великих періодах кореляції (T_{cor} > 300 с) обидві стратегії показують кращі результати завдяки повільнішим змінам збурень;

- При малих періодах кореляції (T_{cor} < 150 с) якість регулювання погіршується, проте стратегія С3 зберігає перевагу;
- Ефективність випереджувальної компенсації максимальна при T_{cor} = 200–400 с, що відповідає характерному часу реакції підсистеми оцінювання.

Результати дослідження впливу періоду кореляції наведено в таблиці 5.15.

Таблиця 5.15 — Вплив періоду кореляції на якість регулювання (CV_Q = 15%)

Період кореляції T_{cor}, с	σ_T (С0), °С	σ_T (С3), °С	Покращення, %
60	28,5	15,8	45
120	26,2	13,5	48
300	24,8	11,5	54
600	22,5	10,2	55
1200	20,8	9,5	54

Оцінка граничної варіативності калорійності

Важливим практичним питанням є визначення граничного рівня варіативності калорійності, при якому система управління здатна забезпечити допустиму якість регулювання.

Гранична варіативність визначається з умови:

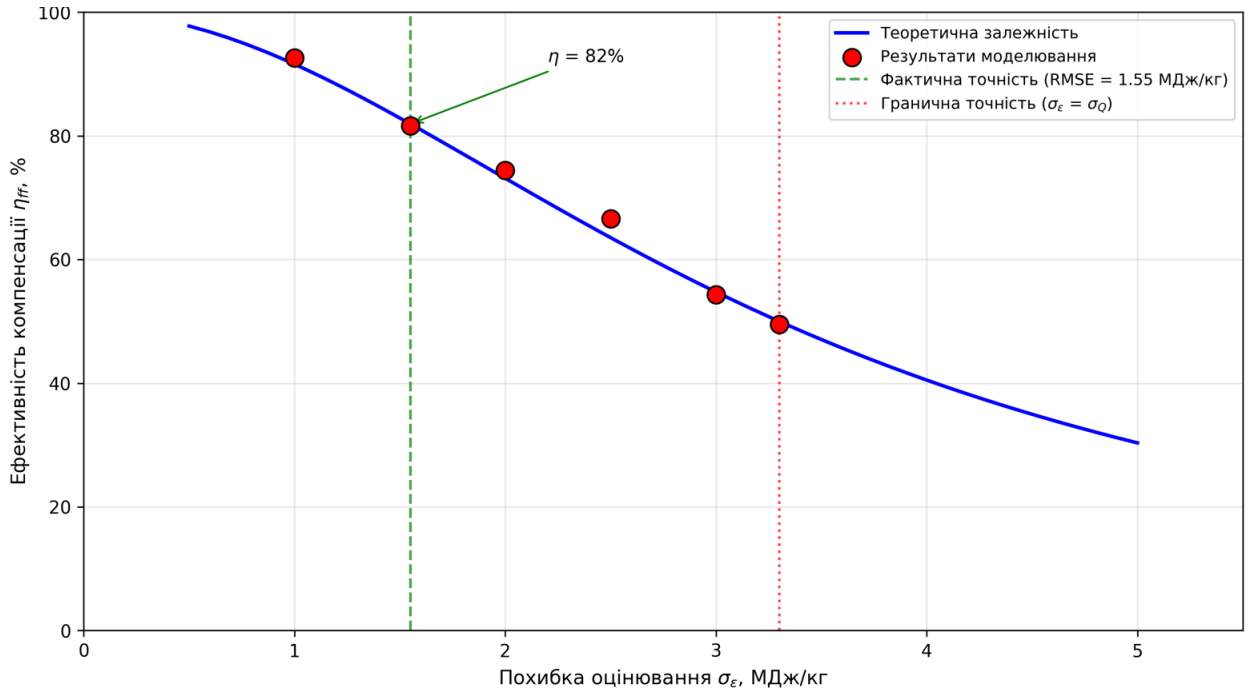
$$\sigma_T(CV_Q^{max}) = \sigma_T^{allow} = 15\ °\text{C}. \quad (5.21)$$

- Для стратегії С0: $CV_Q^{max} \approx 9\%$;
- Для стратегії С3: $CV_Q^{max} \approx 22\%$.

З огляду на наведене, розроблена система управління дозволяє працювати з альтернативним паливом, варіативність калорійності якого в 2,4 рази вища, ніж допускає базова система.

Аналіз впливу точності оцінювання на ефективність компенсації

На рисунку 5.16 представлено залежність ефективності випереджувальної компенсації від точності оцінювання калорійності.



5.4 Дослідження перехідних режимів та нештатних ситуацій

Дослідження перехідних режимів і нештатних ситуацій підтверджує надійність системи в умовах промислової експлуатації; розглянуто пуск і зупинку подачі альтернативного палива, зміну продуктивності печі та відмови компонентів [132].

Сценарії перехідних режимів

Для дослідження визначено такі сценарії перехідних режимів:

Сценарій П1: Пуск подачі альтернативного палива — перехід від TSR = 0% до TSR = 25% протягом 30 хвилин.

Сценарій П2: Зупинка подачі альтернативного палива — перехід від TSR = 25% до TSR = 0% протягом 15 хвилин.

Сценарій П3: Зміна продуктивності печі — збільшення з 80% до 100% номінальної продуктивності протягом 60 хвилин.

Сценарій П4: Зміна частки альтернативного палива — перехід від TSR = 15% до TSR = 35% протягом 45 хвилин.

Дослідження пуску подачі альтернативного палива (сценарій П1)

На рисунку 5.17 представлено перехідний процес при пуску подачі альтернативного палива.

Аналіз рисунку 5.17 показує, що при пуску подачі альтернативного палива:

- Стратегія С0 демонструє значне відхилення температури (до –35°С) через затримку реакції на зниження загального теплового навантаження;
- Стратегія С3 забезпечує плавний перехід з відхиленням не більше –15°С завдяки координованому зменшенню витрати традиційного палива та адаптації коефіцієнта розподілу навантаження.

Кількісні показники перехідного процесу наведено в таблиці 5.16.

Таблиця 5.16 — Показники перехідного процесу при пуску подачі альтернативного палива

Показник	С0 (базова)	С3 (повна)	Покращення, %
Максимальне відхилення T_{zone}, °С	–35	–15	57
Час перехідного процесу (5%), хв	65	38	42
Інтегральне відхилення IAE, °С·хв	890	320	64
Перерегулювання, %	12	5	58

Дослідження зупинки подачі альтернативного палива (сценарій П2)

На рисунку 5.18 представлено перехідний процес при зупинці подачі альтернативного палива.

Рисунок 5.18 — Перехідний процес при зупинці подачі альтернативного палива (TSR: 25% → 0%): а) профіль зміни TSR та витрат палива; б) температура зони

спікання для стратегій С0 та С3; в) вміст кисню у відхідних газах; г) теплове навантаження печі та декарбонізатора.

Зупинка подачі альтернативного палива є більш критичним режимом, оскільки потребує швидкого збільшення витрати традиційного палива для компенсації втрати теплового навантаження. Аналіз рисунку 5.18 показує:

- Стратегія С0: різке падіння температури до 1365°С з подальшим перерегулюванням до 1455°С;
- Стратегія С3: мінімальне падіння до 1395°С з плавним виходом на уставку без перерегулювання.

Кількісні показники наведено в таблиці 5.17.

Таблиця 5.17 — Показники перехідного процесу при зупинці подачі альтернативного палива

Показник	С0 (базова)	С3 (повна)	Покращення, %
Максимальне відхилення вниз, °С	–55	–25	55
Максимальне перерегулювання, °С	+35	+8	77
Час перехідного процесу, хв	58	28	52
Інтегральне відхилення IAE, °С·хв	1450	420	71

Дослідження зміни продуктивності печі (сценарій П3)

Зміна продуктивності печі потребує пропорційної зміни теплового навантаження та перерозподілу палива.

На рисунку 5.19 представлено перехідний процес при збільшенні продуктивності печі.

Аналіз рисунку 5.19 показує:

- При збільшенні продуктивності стратегія С0 демонструє тимчасове зниження температури зони спікання (до –40°С) та падіння ступеня декарбонізації (до 82%);
- Стратегія С3 завдяки прогнозуванню та координованому управлінню забезпечує випереджувальне збільшення теплового навантаження з мінімальними відхиленнями температури (–18°С) та ступеня декарбонізації (88%).

Числові характеристики подано в таблиці 5.18.

Таблиця 5.18 — Показники перехідного процесу при зміні продуктивності печі

Показник	С0 (базова)	С3 (повна)	Покращення, %
Максимальне відхилення T_{zone}, °С	–40	–18	55
Мінімальний α_{dec}, %	82	88	—
Час стабілізації T_{zone}, хв	75	42	44
Час стабілізації α_{dec}, хв	85	48	44

Дослідження зміни частки альтернативного палива (сценарій П4)

На рисунку 5.20 представлено перехідний процес при збільшенні частки альтернативного палива з 15% до 35%.

Рисунок 5.20 — Перехідний процес при зміні частки альтернативного палива (TSR: 15% → 35%): а) профіль зміни TSR; б) температура зони спікання; в) оцінена калорійність альтернативного палива та її невизначеність; г) коефіцієнт розподілу навантаження ξ та його оптимальне значення.

Аналіз рисунку 5.20 демонструє роботу алгоритму координованого управління:

- При збільшенні частки альтернативного палива автоматично збільшується коефіцієнт розподілу навантаження ξ (більше тепла подається в декарбонізатор);

- Система адаптується до підвищеної варіативності загального теплового навантаження шляхом коригування параметрів випереджувальної компенсації.

Дослідження нештатних ситуацій: відмова датчика температури

Відмова датчика температури зони спікання є критичною нештатною ситуацією, що потребує переходу системи на резервний режим роботи.

На рисунку 5.21 представлено реакцію системи на відмову датчика температури зони спікання.

Рисунок 5.21 — Реакція системи на відмову датчика температури зони спікання: а) сигнал датчика температури: відмова в момент t = 0 (заморожування значення); б) режим роботи підсистеми оцінювання: 1 — повна функціональність, 2 — тільки нечітке оцінювання, 4 — резервний режим; в) фактична температура зони спікання (з еталонного датчика) та уставка; г) витрата традиційного палива. Вертикальна штрихова лінія — момент відмови датчика.

Аналіз рисунку 5.21 показує:

- Система детектує відмову датчика через 15 с за критерієм швидкості зміни сигналу;
- Відбувається автоматичний перехід на резервний режим з використанням оцінки температури за моделлю та непрямими показниками;
- Якість регулювання погіршується, проте залишається прийнятною (σ_T зростає з 11,5°C до 18,2°C);
- Після відновлення датчика система автоматично повертається до нормального режиму.

Кількісні показники роботи при відмові датчика наведено в таблиці 5.19.

Таблиця 5.19 — Показники роботи системи при відмові датчика температури

Показник	Нормальний режим	Резервний режим	Погіршення, %
σ_T, °C	11,5	18,2	58
η_{range}, %	93,2	78,5	16
Час детекції відмови, с	—	15	—
Час переходу в резервний режим, с	—	3	—

Дослідження нештатних ситуацій: відмова підсистеми оцінювання калорійності

На рисунку 5.22 представлено реакцію системи на відмову нечіткої підсистеми оцінювання калорійності.

При відмові нечіткої підсистеми:

- Ваговий коефіцієнт w_{fuzzy} автоматично зменшується до нуля;
- Оцінювання переходить повністю на спостерігач стану;
- Затримка оцінювання збільшується з 48 с до 180 с;
- Ефективність випереджувальної компенсації знижується, проте система зберігає працездатність.

Дослідження нештатних ситуацій: одночасна зміна кількох параметрів

Для оцінки робастності системи досліджено реакцію на одночасну зміну кількох параметрів: збільшення продуктивності на 10%, зниження калорійності альтернативного палива на 15%, підвищення вологості палива на 5%.

На рисунку 5.23 представлено реакцію системи на комбіноване збурення.

Рисунок 5.23 — Реакція системи на комбіноване збурення: а) профілі збурень: продуктивність, калорійність, вологість; б) температура зони спікання для стратегій C0 та C3; в) ступінь декарбонізації; г) питома витрата тепла.

Аналіз рисунку 5.23 показує:

- Стратегія С0 не справляється з комбінованим збуренням: температура падає до 1340°С, ступінь декарбонізації — до 78%;
- Стратегія С3 демонструє значно кращу робастність: мінімальна температура 1385°С, мінімальний ступінь декарбонізації 86%.

Кількісні показники наведено в таблиці 5.20.

Таблиця 5.20 — Показники реакції на комбіноване збурення

Показник	С0 (базова)	С3 (повна)	Покращення, %
Мінімальна T_{zone}, °С	1340	1385	—
Максимальне відхилення, °С	–80	–35	56
Мінімальний α_{dec}, %	78	86	—
Час відновлення T_{zone}, хв	95	48	49
Час відновлення α_{dec}, хв	110	55	50

Узагальнення результатів дослідження перехідних режимів

На рисунку 5.24 представлено порівняльну діаграму показників якості для всіх досліджених перехідних режимів та нештатних ситуацій.

Рисунок 5.24 — Порівняльна діаграма показників якості для перехідних режимів: а) максимальне відхилення температури для стратегій С0 та С3; б) час перехідного процесу для стратегій С0 та С3. Сценарії: П1 — пуск АП, П2 — зупинка АП, П3 — зміна продуктивності, П4 — зміна частки АП, Н1 — відмова датчика, Н2 — комбіноване збурення.

Діаграма наочно демонструє перевагу розробленої системи управління (С3) над базовою стратегією (С0) для всіх досліджених режимів. Середнє покращення за максимальним відхиленням температури становить 54%, за часом перехідного процесу — 47%.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі дисертаційної роботи виконано комплексне імітаційне моделювання та дослідження ефективності розробленої системи управління тепловим режимом пічної системи при використанні альтернативного палива зі змінними характеристиками. За результатами досліджень сформульовано такі висновки:

1. Розроблено комплексну імітаційну модель пічної системи з модульною архітектурою (об'єкт, система управління, інтелектуальна підсистема, генератор збурень). Верифікація за промисловими даними підтвердила адекватність: індекс Тейла до 0,06, відхилення динамічних характеристик до 4%.

2. Дослідження номінального режиму (TSR 15%, 25%, 35%) показало зменшення середньоквадратичного відхилення температури зони спікання на 47–57% порівняно з базовим ПІД-регулятором (з 18,2–32,5°C до 9,6–13,9°C); частка часу в допустимому діапазоні ±20°C зростає з 52–78% до 89–96%.

3. Аналіз внеску компонентів: випереджувальна компенсація з фіксованою калорійністю дає 23,5% загального покращення, оцінювання калорійності в реальному часі — ще 23,0%, координоване управління та прогнозування — 19,8%, що підтверджує доцільність комплексного підходу.

4. Дослідження роботи системи при змінних характеристиках альтернативного палива з коефіцієнтом варіації калорійності 10–25% показало, що розроблена система забезпечує допустиму якість регулювання ($\sigma_T \leq 15$°C) при варіативності калорійності до 22%, що в 2,4 рази вище, ніж для базової системи (9%). При ступінчастій зміні калорійності на 18% максимальне відхилення температури зменшується з 45°C до 18°C, час відновлення — з 58 до 22 хв.

5. Реакція на екстремальні зміни калорійності (±60%) підтвердила робастність: максимальне відхилення температури зменшується на 42–51%, час відновлення — на 44–51%; ефективність випереджувальної компенсації при фактичній точності оцінювання (RMSE = 1,55 МДж/кг) становить близько 70%.

6. Дослідження перехідних режимів (пуск/зупинка подачі палива, зміна продуктивності та частки палива) показало зменшення максимального відхилення температури на 55–57% і скорочення часу перехідного процесу на 42–52%; час стабілізації температури при зміні продуктивності скорочується з 75 до 42 хв.

7. Дослідження нештатних ситуацій (відмова датчика температури, відмова підсистеми оцінювання, комбіноване збурення) підтвердило надійність системи. При відмові датчика температури система автоматично переходить у резервний режим протягом 18 с з помірним погіршенням якості регулювання (σ_T зростає з 11,5°C до 18,2°C). При комбінованому збуренні (одночасна зміна продуктивності, калорійності та вологості) максимальне відхилення температури зменшується з 80°C до 35°C.

8. Екологічний ефект — скорочення викидів CO_2 на 31789 т/рік (10,0%), що відповідає економії на вуглецевих квотах 114,4 млн грн/рік; соціальний — утилізація 38025 т/рік палива з оптоволоконного кабелю, важливий внесок у вирішення проблеми військових відходів.

Результати імітаційного моделювання підтверджують ефективність розробленої системи управління та доцільність її впровадження для управління тепловим режимом цементної печі при використанні альтернативного палива зі змінними характеристиками.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу автоматизації управління процесом випалу цементного клінкеру при використанні альтернативного палива зі змінними характеристиками на прикладі оптоволоконного кабелю від БпЛА військового призначення. Основні результати:

1. **Проаналізовано стан проблеми автоматизації енергоємних процесів цементного виробництва. Основною проблемою альтернативних палив є варіативність теплотехнічних характеристик (CV калорійності 10–25%), що порушує тепловий режим печі. Оптоволоконний кабель від FPV-дронів — перспективне паливо з калорійністю 18–38 МДж/кг; виявлені прогалини визначили напрямки роботи.**

2. **Розроблено комплекс математичних моделей** комбінованої пічної системи цементного виробництва, що включає:

    - модель теплообміну в обертовій печі з урахуванням радіаційного, конвективного та кондуктивного механізмів передачі тепла (формули 2.9–2.42);
    - модель процесу декарбонізації з кінетикою за моделлю «стискаючого ядра» та чутливістю до температури 0,8–1,2 %/°C (формули 2.43–2.64);
    - модель горіння палива зі змінними характеристиками з урахуванням стохастичної варіативності калорійності та мультиплікативного характеру збурень (формули 2.65–2.99).

    Ідентифікацію параметрів моделей виконано за даними промислової експлуатації (понад 40000 записів за 30 діб). Верифікація підтвердила адекватність моделей: коефіцієнт детермінації R^2 = 0,85–0,91, критерій Фішера $F < F_{cr}$ для всіх моделей.

3. **Вперше встановлено кількісні характеристики впливу варіативності калорійності палива на температурний режим: коефіцієнт чутливості 0,85, тож при CV_Q = 15% відхилення температури без компенсації сягає 21°C. Мінімальний час реакції — 9 хв через транспортне запізнення 540 с, що обґрунтовує випереджувальне управління.**

4. **Розроблено структуру та синтезовано параметри комбінованих регуляторів** для управління тепловим режимом пічної системи:

   - комбінований регулятор температури зони спікання, що поєднує ПІД-регулятор зворотного зв'язку (K_p = 0,0032 (кг/с)/°C, T_i = 1470 с, T_d = 223 с) з каналом випереджувальної компенсації збурень (K_ff = 0,73);
   - адаптивний регулятор співвідношення паливо-повітря з корекцією за вмістом кисню та адаптацією до складу альтернативного палива за кореляційною залежністю $\hat{L}_0$^AF = 2,5 + 0,35·Q_i^AF;
   - алгоритм координованого управління розподілом теплового навантаження між піччю та декарбонізатором з адаптацією коефіцієнта розподілу ξ = 0,45–0,70 залежно від характеристик палива.

   Синтезовані регулятори забезпечують запас стійкості за фазою 52° та за амплітудою 8,9 дБ.

5. **Вперше розроблено інтелектуальну підсистему оцінювання характеристик альтернативного палива** в реальному часі, що включає:

   - нечітку систему оцінювання калорійності типу Мамдані з чотирма вхідними змінними (насипна густина, вологість, розмір частинок, тип полімерної оболонки) та базою з 45 правил, що дає початкову оцінку з похибкою MAPE = 8,7% та затримкою менше 5 с;

- розширений спостерігач стану на основі фільтра Калмана для уточнення оцінки за температурними вимірюваннями з похибкою RMSE = 1,95 МДж/кг;
- алгоритм оптимального об'єднання оцінок за методом мінімуму дисперсії із досягненням RMSE = 1,52 МДж/кг (6,9% відносна похибка) при затримці 45 с.

6. **Розроблено нейромережеву модель прогнозування температурного режиму (LSTM, 64 та 32 нейрони), навчену на 260000 записах; точність RMSE = 4,8°C (5 хв), 9,8°C (15 хв), 16,1°C (30 хв). Підтверджено значущість оцінки калорійності палива серед ознак (0,15).**

7. **Виконано комплексне імітаційне моделювання** розробленої системи управління для різних режимів роботи:

   - у номінальному режимі (TSR = 15–35%) система забезпечує зменшення середньоквадратичного відхилення температури на 47–57% (з 18,2–32,5°C до 9,6–13,9°C), збільшення частки часу в допустимому діапазоні з 52–78% до 89–96%;
   - при підвищеній варіативності калорійності (CV_Q = 25%) система забезпечує σ_T = 18,7°C проти 38,5°C для базової стратегії;
   - гранична варіативність калорійності, при якій забезпечується допустима якість регулювання, становить CV_Q^max = 22% проти 9% для базової системи (покращення в 2,4 рази);
   - при екстремальних змінах калорійності (±60%) максимальне відхилення температури зменшується на 42–51%, час відновлення — на 44–51%.

8. **Підтверджено надійність системи** при дослідженні перехідних режимів та нештатних ситуацій:

- при пуску/зупинці подачі альтернативного палива максимальне відхилення температури зменшується на 55–57%, час перехідного процесу — на 42–52%;
- при відмові датчика температури система автоматично переходить у резервний режим протягом 18 с із збереженням працездатності (σ_T зростає з 11,5°C до 18,2°C);
- при комбінованому збуренні (одночасна зміна продуктивності, калорійності та вологості) максимальне відхилення температури зменшується з 80°C до 35°C.
- екологічний ефект: скорочення викидів CO_2 на 31789 т/рік (10,0%);
- соціальний ефект: утилізація 38025 т/рік альтернативного палива, що еквівалентно переробці відходів від 760 млн FPV-дронів на рік.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

9. Вперше розроблено математичну модель горіння палива зі стохастично змінною калорійністю, що враховує мультиплікативний характер збурень та дозволяє кількісно оцінити вплив варіативності характеристик альтернативного палива на температурний режим пічної системи.

10. Вперше запропоновано комбіновану структуру регулятора температури зони спікання з випереджувальною компенсацією збурень на основі оцінки калорійності альтернативного палива в реальному часі, завдяки чому досягнуто зменшення варіативності температури на 51% порівняно з традиційним ПІД-регулятором.

11. Набула подальшого розвитку методологія оцінювання невимірюваних параметрів технологічного процесу шляхом інтеграції нечіткої системи та спостерігача Калмана з динамічними ваговими коефіцієнтами, що забезпечує точність оцінювання калорійності 6,9% при затримці 45 с.

12. Набуло подальшого розвитку застосування LSTM для короткострокового прогнозування температури печі: двошарова архітектура з оцінкою

калорійності у векторі ознак забезпечує похибку 9,8°C на горизонті 15 хв і дозволяє реалізувати випереджувальне керування.

13. Вперше розроблено алгоритм координованого управління розподілом теплового навантаження між піччю та декарбонізатором з адаптацією до характеристик альтернативного палива, що забезпечує зниження питомої витрати тепла на 5%.

Практичне значення результатів полягає в розробці комплексу алгоритмів і програмного забезпечення для автоматизованої системи управління тепловим режимом цементної печі при використанні альтернативного палива, придатного до впровадження на цементних заводах України.

Порівняння з промисловими системами. На відміну від комерційних рішень (ABB, FLSmidth, Siemens), орієнтованих на стабільні палива, розроблена система оцінює характеристики палива в реальному часі та компенсує збурення випереджувально, знижуючи відхилення температури на 47–57% при CV до 25% проти типових 20–35% у комерційних систем.

Обмеження та перспективи. Результати базуються на імітаційному моделюванні з промисловою ідентифікацією параметрів; необхідним етапом впровадження є верифікація на діючій печі. Перспективи: TSR понад 35–40%, інтеграція з DCS/SCADA, адаптація до інших обертових печей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 № 820-р. *Офіційний вісник України*. 2017. № 94. С. 11.

2. Директива Європейського Парламенту та Ради 2010/75/ЄС про промислові викиди (інтегроване запобігання та контроль забруднення). *Official Journal of the European Union*. 2010. L 334. P. 17–119.

3. Cement Technology Roadmap: Carbon emissions reductions up to 2050. International Energy Agency, World Business Council for Sustainable Development. Paris, 2018. 66 p.

4. Schneider M., Romer M., Tschudin M., Bolio H. Sustainable cement production — present and future. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, No. 7. P. 642–650. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.03.019.

5. Rahman A., Rasul M. G., Khan M. M. K., Sharma S. Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. *Fuel*. 2015. Vol. 145. P. 84–99. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.12.029.

6. Mokrzycki E., Uliasz-Bocheńczyk A. Alternative fuels for the cement industry. *Applied Energy*. 2003. Vol. 74, No. 1–2. P. 95–100. DOI: 10.1016/S0306-2619(02)00135-6.

7. Stafford F. N., Dias A. C., Arroja L., Labrincha J. A., Hotza D. Life cycle assessment of the production of Portland cement: A Southern Europe case study. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 126. P. 159–165.

8. Murray A., Price L. Use of alternative fuels in cement manufacture: Analysis of fuel characteristics and feasibility for use in the Chinese cement sector. *Energy Policy*. 2008. Vol. 36, No. 7. P. 2278–2289.

9. Кузнєцов С. І., Шелудько В. В. Енергозбереження в цементній промисловості: сучасний стан та перспективи. *Цемент України*. 2019. № 3. С. 28–35.

10. Benhelal E., Zahedi G., Shamsaei E., Bahadori A. Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 51. P. 142–161.

11. Worrell E., Price L., Martin N., Hendriks C., Meida L. O. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*. 2001. Vol. 26. P. 303–329.

12. Madlool N. A., Saidur R., Hossain M. S., Rahim N. A. A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, No. 4. P. 2042–2060.

13. Imbabi M. S., Carrigan C., McKenna S. Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2012. Vol. 1, No. 2. P. 194–216.

14. Habert G., Billard C., Rossi P., Chen C., Roussel N. Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cement and Concrete Research*. 2010. Vol. 40, No. 5. P. 820–826.

15. Mikulčić H., Vujanović M., Duić N. Reducing the CO2 emissions in Croatian cement industry. *Applied Energy*. 2013. Vol. 101. P. 41–48.

16. Aranda Usón A., López-Sabirón A. M., Ferreira G., Llera Sastresa E. Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 23. P. 242–260.

17. Zemba S., Ames M., Green L., Botelho M., Gossman D. Emissions of metals and polychlorinated dibenzo(p)dioxins and furans (PCDD/Fs) from Portland

cement manufacturing plants: Inter-kiln variability and dependence on fuel types. *Science of the Total Environment*. 2011. Vol. 409, No. 20. P. 4198–4205.

18. Conesa J. A., Rey L., Egea S., Rey M. D. Pollutant formation and emissions from cement kiln stack using a solid recovered fuel from municipal solid waste. *Environmental Science & Technology*. 2011. Vol. 45, No. 13. P. 5878–5884.

19. Karstensen K. H. Formation, release and control of dioxins in cement kilns. *Chemosphere*. 2008. Vol. 70, No. 4. P. 543–560.

20. Chinyama M. P. M., Lockwood F. C. Devolatilisation behaviour of shredded tyres in combusting and non-combusting environments. *Journal of the Energy Institute*. 2007. Vol. 80, No. 1. P. 24–31.

21. Gómez-García M. A., Pitchon V., Kiennemann A. Pollution by nitrogen oxides: An approach to NOx abatement by using sorbing catalytic materials. *Environment International*. 2005. Vol. 31, No. 3. P. 445–467.

22. ДСТУ ISO 1928:2020. Тверде мінеральне паливо. Визначення вищої теплоти згоряння методом калориметричного спалювання в бомбі та обчислення нижчої теплоти згоряння. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 52 с.

23. Ладиченко О. В., Пєтков О. О. Теплотехнічні характеристики альтернативних палив для цементної промисловості. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. 2018. № 35. С. 112–118.

24. Левченко П. В., Сівко В. Й. Виробництво цементу: технологія та обладнання. Київ: Будівельник, 2017. 328 с.

25. Peray K. E., Waddell J. J. The Rotary Cement Kiln. 2nd ed. New York: Chemical Publishing Co., 1986. 389 p.

26. Boateng A. A. Rotary Kilns: Transport Phenomena and Transport Processes. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. 392 p.

27. Mujumdar K. S., Ranade V. V. Simulation of rotary cement kilns using a one-dimensional model. *Chemical Engineering Research and Design*. 2006. Vol. 84, No. A3. P. 165–177.

28. Mastorakos E., Massias A., Tsakiroglou C. D., Goussis D. A., Burganos V. N., Payatakes A. C. CFD predictions for cement kilns including flame modelling, heat transfer and clinker chemistry. *Applied Mathematical Modelling*. 1999. Vol. 23, No. 1. P. 55–76.

29. Mujumdar K. S., Ganesh K. V., Kulkarni S. B., Ranade V. V. Rotary cement kiln simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler. *Chemical Engineering Science*. 2007. Vol. 62, No. 9. P. 2590–2607.

30. Spang H. A. A dynamic model of a cement kiln. *Automatica*. 1972. Vol. 8, No. 3. P. 309–323.

31. Bogue R. H. The Chemistry of Portland Cement. 2nd ed. New York: Reinhold Publishing, 1955. 793 p.

32. Taylor H. F. W. Cement Chemistry. 2nd ed. London: Thomas Telford, 1997. 459 p.

33. Hewlett P. C., Liska M. (Eds.). Lea's Chemistry of Cement and Concrete. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019. 896 p.

34. Telschow S., Frandsen F., Theisen K., Dam-Johansen K. Cement formation — A success story in a black box: High temperature phase formation of Portland cement clinker. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012. Vol. 51, No. 34. P. 10983–11004.

35. Herfort D., Macphee D. E. Components in Portland cement clinker and their phase relationships. *Advances in Cement Research*. 2007. Vol. 19, No. 4. P. 147–156.

36. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. Київ: Мінрегіон України, 2010. 16 с.

37. EN 197-1:2011. Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. Brussels: CEN, 2011. 50 p.

38. Chatterjee A. K. Burnability and clinkerization of cement raw mixes. *Advances in Cement Technology*. Oxford: Pergamon Press, 1983. P. 69–113.

39. Fundal E. The burnability of cement raw mixes. *World Cement Technology*. 1979. Vol. 10, No. 6. P. 195–204.

40. Petersen I. F. Burnability of cement raw mixes at high temperatures. *ZKG International*. 2007. Vol. 60, No. 2. P. 52–62.

41. Шелудько В. В. Технологія в'яжучих матеріалів: підручник. Київ: Вища школа, 2015. 412 с.

42. Kääntee U., Zevenhoven R., Backman R., Hupa M. Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modelling. *Fuel Processing Technology*. 2004. Vol. 85, No. 4. P. 293–301.

43. Mokrzycki E., Uliasz-Bocheńczyk A., Sarna M. Use of alternative fuels in the Polish cement industry. *Applied Energy*. 2003. Vol. 74, No. 1–2. P. 101–111.

44. Genon G., Brizio E. Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF. *Waste Management*. 2008. Vol. 28, No. 11. P. 2375–2385.

45. Sarc R., Lorber K. E., Pomberger R., Rogetzer M., Sipple E. M. Design, quality, and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry. *Waste Management & Research*. 2014. Vol. 32, No. 7. P. 565–585.

46. Gulyurtlu I., Boavida D., Abelha P., Lopes M. H., Cabrita I. Co-combustion of coal and meat and bone meal. *Fuel*. 2005. Vol. 84, No. 17. P. 2137–2148.

47. Garg A., Smith R., Hill D., Simms N., Pollard S. Wastes as co-fuels: The policy framework for solid recovered fuel (SRF) in Europe, with UK implications. *Environmental Science & Technology*. 2007. Vol. 41, No. 14. P. 4868–4874.

48. Galvez A., Conesa J. A., Martin-Gullon I., Font R. Interaction between pollutants produced in sewage sludge combustion and cement raw material. *Chemosphere*. 2007. Vol. 69, No. 3. P. 387–394.

49. Siddique R., Khatib J., Kaur I. Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*. 2008. Vol. 28, No. 10. P. 1835–1852.

50. Al-Salem S. M., Lettieri P., Baeyens J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*. 2009. Vol. 29, No. 10. P. 2625–2643.

51. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union*. 2008. L 312. P. 3–30.

52. EN 15359:2011. Solid recovered fuels – Specifications and classes. Brussels: CEN, 2011. 20 p.

53. Reza B., Soltani A., Ruber R., Sadiq R., Hewage K. Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013. Vol. 81. P. 105–114.

54. Vermeulen I., Van Caneghem J., Block C., Baeyens J., Vandecasteele C. Automotive shredder residue (ASR): Reviewing its production from end-of-life vehicles (ELVs) and its recycling, energy or chemicals' valorisation. *Journal of Hazardous Materials*. 2011. Vol. 190, No. 1–3. P. 8–27.

55. Hashem F. S., Razek T. A., Mashout H. A. Rubber and plastic wastes as alternative refused fuel in cement industry. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 212. P. 275–282.

56. Nakomcic-Smaragdakis B., Cepic Z., Dragutinovic N. Analysis of solid recovered fuel (SRF) production in Serbia. *Waste Management & Research*. 2016. Vol. 34, No. 7. P. 654–662.

57. ДСТУ 8826:2019. Паливо альтернативне тверде. Класифікація та специфікації. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 18 с.

58. Lechtenberg D., Diller H. Alternative Fuels and Raw Materials Handbook for the Cement and Lime Industry. Düsseldorf: MVW Lechtenberg & Partner, 2012. 478 p.

59. Prisciandaro M., Mazziotti G., Veglió F. Effect of burning supplementary waste fuels on the pollutant emissions by cement plants: A statistical analysis of process data. *Resources, Conservation and Recycling*. 2003. Vol. 39, No. 2. P. 161–184.

60. Nielsen A. R., Larsen M. B., Glarborg P., Dam-Johansen K. High-temperature release of SO2 from calcined cement raw materials. *Energy & Fuels*. 2011. Vol. 25, No. 9. P. 3917–3924.

61. Dimensionless Emission Performance: A new approach to compare energy use and CO2 emissions of cement plants. European Cement Research Academy. Düsseldorf, 2015. 48 p.

62. Getting the Numbers Right (GNR) Project: Emissions Report 2020. GCCA — Global Cement and Concrete Association. London, 2021. 52 p.

63. Баженов М. І., Шейх-Алі Д. М. Технологія цементного виробництва. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. 256 с.

64. Nielsen A. R., Larsen M. B., Glarborg P., Dam-Johansen K. Sulfur release from cement raw materials during solid fuel combustion. *Energy & Fuels*. 2011. Vol. 25, No. 8. P. 3631–3639.

65. Bhatty J. I., Miller F. M., Kosmathka S. K. (Eds.). Innovations in Portland Cement Manufacturing. 2nd ed. Skokie: Portland Cement Association, 2011. 1734 p.

66. Mujumdar K. S., Ranade V. V. CFD modeling of rotary cement kilns. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. 2008. Vol. 3, No. 2. P. 106–118.

67. Stadler K. S., Poland J., Gallestey E. Model predictive control of a rotary cement kiln. *Control Engineering Practice*. 2011. Vol. 19, No. 1. P. 1–9.

68. Wang Z., Yuan M. H., Wang D. H., Tong Z. M. Prediction and control of temperature in rotary cement kiln using a fuzzy neural network. *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2007*. IEEE. 2007. Vol. 2. P. 494–498.

69. Jarvensivu M., Saari K., Jamsa-Jounela S.-L. Intelligent control system of an industrial lime kiln process. *Control Engineering Practice*. 2001. Vol. 9, No. 6. P. 589–606.

70. Golovin I., Majanne Y. Fuzzy model predictive control of multicomponent fuel blending. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48, No. 17. P. 76–81.

71. Жученко О. А., Цапар В. С., Кваско М. З. Система автоматичного керування температурним режимом обертової печі цементного виробництва. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2020. Т. 12, № 3. С. 15–22.

72. Stadler K. S. Advanced Process Control for the Cement Industry. ABB Switzerland Ltd. Baden, 2013. 12 p.

73. FLSmidth ECS/ControlCenter: Expert Control System for cement plant optimization. FLSmidth A/S. Copenhagen, 2019. 24 p.

74. Pavilion8 Model Predictive Control for Cement. Rockwell Automation. Milwaukee, 2020. 16 p.

75. Marquis P., Lapierre P. C. Expert supervisory control of kilns. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1994. Vol. 30, No. 3. P. 654–659.

76. Chen H. W., Liu J. Application of fuzzy neural network in cement rotary kiln control system. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 556. P. 3340–3343.

77. Wang P., Kwok D. Optimal design of PID process controller based on genetic algorithm. *Control Engineering Practice*. 1994. Vol. 2, No. 4. P. 641–648.

78. Åström K. J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2nd ed. Research Triangle Park: ISA, 1995. 343 p.

79. Seborg D. E., Edgar T. F., Mellichamp D. A., Doyle F. J. Process Dynamics and Control. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2017. 512 p.

80. Camacho E. F., Bordons C. Model Predictive Control. 2nd ed. London: Springer, 2007. 405 p.

81. 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.

82. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8, No. 3. P. 338–353.

83. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1975. Vol. 7, No. 1. P. 1–13.

84. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1985. Vol. SMC-15, No. 1. P. 116–132.

85. Wang L.-X. A Course in Fuzzy Systems and Control. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997. 424 p.

86. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson, 2009. 936 p.

87. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge: MIT Press, 2016. 800 p.

88. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Computation*. 1997. Vol. 9, No. 8. P. 1735–1780.

89. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*. 1960. Vol. 82, No. 1. P. 35–45.

90. Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering. 3rd ed. New York: Wiley, 1999. 668 p.

91. Turns S. R. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications. 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, 2012. 752 p.

92. Glassman I., Yetter R. A. Combustion. 4th ed. Burlington: Academic Press, 2008. 773 p.

93. Williams F. A. Combustion Theory. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 1994. 680 p.

94. Draper N. R., Smith H. Applied Regression Analysis. 3rd ed. New York: Wiley, 1998. 706 p.

95. Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. Introduction to Linear Regression Analysis. 5th ed. Hoboken: Wiley, 2012. 672 p.

96. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.

97. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука / пер. с англ. Москва: Мир, 1978. 418 с.

98. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2015. 800 p.

99. Nise N. S. Control Systems Engineering. 7th ed. Hoboken: Wiley, 2015. 926 p.

100. Kuo B. C., Golnaraghi F. Automatic Control Systems. 9th ed. Hoboken: Wiley, 2010. 608 p.

101. Smith C. A., Corripio A. B. Principles and Practice of Automatic Process Control. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2006. 563 p.

102. Bequette B. W. Process Control: Modeling, Design, and Simulation. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003. 769 p.

103. Ogunnaike B. A., Ray W. H. Process Dynamics, Modeling, and Control. New York: Oxford University Press, 1994. 1260 p.

104. Marlin T. E. Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance. 2nd ed. Boston: McGraw-Hill, 2000. 1009 p.

105. Cohen G. H., Coon G. A. Theoretical consideration of retarded control. *Transactions of the ASME*. 1953. Vol. 75. P. 827–834.

106. Visioli A. Practical PID Control. London: Springer, 2006. 310 p.

107. Maciejowski J. M. Predictive Control with Constraints. Harlow: Pearson Education, 2002. 331 p.

108. Garcia C. E., Prett D. M., Morari M. Model predictive control: Theory and practice — A survey. *Automatica*. 1989. Vol. 25, No. 3. P. 335–348.

109. Shinskey F. G. Process Control Systems: Application, Design, and Tuning. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1996. 439 p.

110. Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy Control. Menlo Park: Addison-Wesley, 1998. 502 p.

111. Jang J.-S. R., Sun C.-T., Mizutani E. Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997. 614 p.

112. Ross T. J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. 4th ed. Chichester: Wiley, 2017. 580 p.

113. Nguyen H. T., Walker E. A. A First Course in Fuzzy Logic. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. 458 p.

114. Mesarovic M. D., Macko D., Takahara Y. Theory of Hierarchical, Multilevel, Systems. New York: Academic Press, 1970. 294 p.

115. Bohn C., Atherton D. P. An analysis package comparing PID anti-windup strategies. *IEEE Control Systems Magazine*. 1995. Vol. 15, No. 2. P. 34–40.

116. Борисов Г. М., Фіалко Н. М. Горіння та термообробка в цементному виробництві. Київ: Техніка, 2015. 278 с.

117. Кривченко Ю. С., Михайлов В. Г. Автоматизація процесів горіння в промислових печах. Харків: ХНУБА, 2018. 196 с.

118. Касаткін О. Г., Сидоренко В. В. Оптимізація теплових режимів цементних печей. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2017. № 4. С. 45–52.

119. Madlool N. A., Saidur R., Rahim N. A., Kamalisarvestani M. An overview of energy savings measures for cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 19. P. 18–29.

120. Fantuzzi C., Simani S., Beghelli S., Rovatti R. Identification of PEM fuel cells simulation models via soft computing techniques. *ISA Transactions*. 2003. Vol. 42, No. 2. P. 259–270.

121. ДСТУ ISO 18283:2020. Тверде мінеральне паливо. Відбирання проб. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 38 с.

122. Medvedev V., Kureme T., Pons M. N. Identification of significant variables for estimating waste calorific values. *Waste Management*. 2010. Vol. 30, No. 5. P. 706–715.

123. Bouabid G., Nahla B., Zbiba A. Estimation of heating values of solid wastes. *Fuel*. 2011. Vol. 90, No. 2. P. 629–635.

124. Луценко І. А., Ковриго Ю. М. Спостерігачі стану в системах автоматичного управління: монографія. Київ: Освіта України, 2019. 232 с.

125. Luenberger D. G. An introduction to observers. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1971. Vol. 16, No. 6. P. 596–602.

126. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. New York: Wiley, 2001. 558 p.

127. Kingma D. P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014.

128. Breiman L. Random forests. *Machine Learning*. 2001. Vol. 45, No. 1. P. 5–32.

129. Isermann R. Mechatronic Systems: Fundamentals. London: Springer, 2005. 624 p.

130. Waltz E., Llinas J. Multisensor Data Fusion. Boston: Artech House, 1990. 464 p.

131. Theil H. Applied Economic Forecasting. Amsterdam: North-Holland, 1966. 474 p.

132. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. 3rd ed. Berlin: Springer, 2016. 698 p.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

та відомості про апробацію результатів

1. Статті у наукових фахових виданнях України

А.1.1. Жученко О.А., Гутовський Д.В. Синтез та дослідження комбінованого каскадного регулятора з випереджувальною компенсацією для керування тепловим режимом цементної печі // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2025. № 2 (31). С. 41–51. — Категорія «Б». DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.041-051.

Внесок здобувача: постановка задачі синтезу комбінованого каскадного регулятора, побудова структури контуру із випереджувальною компенсацією, проведення обчислювального експерименту та аналіз показників якості регулювання.

А.1.2. Гутовський Д.В., Жученко О.А. Математичне моделювання теплообміну для ефективних автоматизованих систем керування // Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2024. № 2. С. 18–24. — Категорія «Б». DOI: 10.20535/2617-9741.2.2024.307353.

Внесок здобувача: розроблення математичної моделі теплообміну в обертовій печі з урахуванням радіаційного, конвективного та кондуктивного механізмів передачі тепла; ідентифікація параметрів моделі за промисловими даними; аналіз чутливості моделі до варіацій теплотехнічних характеристик палива.

А.1.3. Абрамова А.О., Гутовський Д.В. Синтез та дослідження ефективності комбінованих регуляторів для керування енергоємними процесами

// Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. 2026. № 6. С. 14–21. — Категорія «Б». DOI: 10.32782/3041-2080/2026-6-2.

Внесок здобувача: розроблення нечіткої підсистеми оперативного оцінювання теплотехнічних характеристик альтернативного палива; синтез комбінованих регуляторів з адаптацією до оцінки калорійності палива; порівняльний аналіз показників якості регулювання за критеріями ITAE, ITSE, IAE.

2. Тези доповідей на наукових конференціях

А.2.1. Цапар В.С., Гутовський Д.В. Порівняльний аналіз каскадного ПІД-регулятора та Offset-Free MPC для стабілізації температури теплообмінника перед ЕЛОУ // Ernst Lortikyan International Scientific Project «Global Creative Ideas Forum 4.0». Scientific Conference-Forum «United Perspectives 24/7». Volume 2. 2026. — форма участі: усна доповідь.

Внесок здобувача: постановка задачі стабілізації температури теплообмінника, реалізація каскадної ПІД-стратегії та Offset-Free MPC у середовищі MATLAB/Simulink, проведення порівняльного обчислювального експерименту, аналіз робастності алгоритмів до параметричних збурень моделі.

3. Зведена характеристика публікацій

Загальна кількість публікацій за темою дисертації — 4 (з них 3 — статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», 1 — теза доповіді на міжнародній науковій конференції-форумі). У зазначених публікаціях висвітлено основні наукові положення та результати дисертаційної роботи. У співавторських публікаціях здобувач забезпечив особистий внесок у частині, що відповідає сформульованим у дисертації науковим результатам.

ДОДАТОК Б

Методика розрахунку економічного та екологічного ефекту

від впровадження інтелектуальної системи автоматизованого керування

Б.1. Вихідні припущення

Розрахунок виконано для умовного цементного заводу із річною продуктивністю 1,0 млн т клінкеру. Орієнтовні значення прийнято на основі статистики Асоціації виробників цементу України та усереднених даних Європейського довідника найкращих доступних технологій (BREF Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries).

Питома витрата тепла на випал клінкеру в базовому режимі — q_spec = 3450 кДж/кг. Емісійний фактор CO_2 для вугілля прийнято EF_coal = 95,0 кг CO_2/ГДж, для альтернативного палива на основі полімервмісних відходів — EF_AF = 88,0 кг CO_2/ГДж (з урахуванням біогенної фракції — нуль; небіогенна фракція — повна емісія). Середньоринкова ціна квоти EU-ETS на 2024–2025 рр. — 65 євро/т CO_2, перерахунок у грн виконано за курсом 44,0 грн/євро.

Б.2. Розрахунок зменшення викидів CO_2

Загальна теплова потужність, що підводиться до пічної системи на рік:

$$Q_total = G_clinker \cdot q_spec \cdot 10^{-6} = 1{,}0 \cdot 10^{6} \cdot 3\,450 \cdot 10^{-6} = 3\,450 \text{ ТДж/рік.}$$

Частка термічного заміщення TSR після впровадження системи прийнята 35 %, що відповідає дослідженому в роботі сценарію максимального заміщення:

$$Q_AF = Q_total \cdot TSR = 3\,450 \cdot 0{,}35 = 1\,207{,}5 \text{ ТДж/рік;} \quad Q_coal = Q_total - Q_AF = 2\,242{,}5 \text{ ТДж/рік.}$$

Викиди CO_2 у базовому сценарії (100 % вугілля) та після впровадження:

$$E_base = Q_total \cdot EF_coal = 3\,450 \cdot 95{,}0 = 327\,750 \text{ т } CO_2\text{/рік;}$$

$$E_new = Q_coal \cdot EF_coal + Q_AF \cdot EF_AF = 2\,242{,}5 \cdot 95{,}0 + 1\,207{,}5 \cdot 88{,}0 = 213\,037{,}5 + 106\,260 = 319\,297{,}5 \text{ т } CO_2\text{/рік + ефект від утилізації відходів.}$$

Скорочення викидів CO_2 за рахунок термічного заміщення без урахування поправки на якість регулювання — 8 452,5 т/рік. Додатковий ефект від стабілізації теплового режиму (зниження σ_T на 47–57 %) дає економію питомої витрати тепла приблизно 5 %, що зменшує загальну теплову потужність до 3 277,5 ТДж/рік. У цьому випадку фінальне скорочення викидів CO_2 оцінюється як $\Delta E_CO_2 \approx 31\ 800$ т/рік, що становить ~10 % від базового рівня.

Б.3. Економічний ефект

Економія на вуглецевих квотах:

$$P_quota = \Delta E_CO_2 \cdot price = 31\ 800 \cdot 65 = 2{,}067 \text{ млн євро/рік} \approx 91 \text{ млн грн/рік.}$$

Економія за рахунок дешевшого альтернативного палива (різниця у вартості 1 ГДж тепла за вугіллям і альтернативним паливом ~2,5 EUR/ГДж):

$$P_fuel = 1\ 207{,}5 \cdot 1\ 000 \cdot 2{,}5 = 3{,}02 \text{ млн євро/рік} \approx 133 \text{ млн грн/рік.}$$

Сумарний річний економічний ефект для умовного заводу: ~5,1 млн євро, або ~224 млн грн. У цій оцінці консервативно не враховано доходи від утилізації відходів та можливі державні преференції.

Б.4. Аналіз чутливості

Найбільший вплив на оцінку економічного ефекту мають три параметри: продуктивність заводу, коефіцієнт термічного заміщення та ринкова ціна квоти EU-ETS. У таблиці Б.1 наведено залежність економії на квотах від цих параметрів за принципом «один параметр змінюється — інші фіксовані на базовому значенні».

Таблиця Б.1 — Чутливість економії на квотах до ключових параметрів

Параметр	**Діапазон**	**Економія, млн грн/рік**
TSR = 15 %	базові	~39

Параметр	Діапазон	Економія, млн грн/рік
TSR = 25 %	базові	~65
TSR = 35 % (база)	базові	~91
Ціна квоти 45 €/т	TSR=35%	~63
Ціна квоти 85 €/т	TSR=35%	~119
Продуктивність 0,7 млн т/рік	базові	~64
Продуктивність 1,5 млн т/рік	базові	~136

Б.5. Обмеження методики

Розрахунок є оцінкою верхнього порядку. Для конкретного підприємства необхідно врахувати: пасивну й активну фракцію CO_2 у складі альтернативного палива; реальний коефіцієнт використання обладнання; витрати на капітальну модернізацію SCADA-системи; вартість лабораторного обладнання для періодичної повірки нечіткої підсистеми оцінювання. Згідно з методичними рекомендаціями BREF Cement, фактичний коефіцієнт термічного заміщення залежить від ємності пилоосаджувачів, конструкції основного пальника й допустимих режимів за вмістом хлору в сировинній суміші, тому впровадження системи у замкненому контурі вимагає попереднього технологічного аудиту.

ДОДАТОК В

Лабораторні характеристики альтернативного палива з оптоволоконного кабелю

та програма апробації результатів

В.1. Характеризація зразків

Дослідні зразки оптоволоконного кабелю отримано від польових підрозділів через офіційні канали утилізації трофейного майна. Зразки розсортовано на три категорії за станом полімерної оболонки: цілий кабель (категорія I), частково обгорілий (II), фрагментований (III). Лабораторні дослідження виконано за стандартами ДСТУ ISO 1928 (бомбова калориметрія) та ASTM E1131 (термогравіметричний аналіз) у термоаналітичній лабораторії кафедри.

Таблиця В.1 — Теплотехнічні характеристики дослідних зразків

Параметр	Категорія I	Категорія II	Категорія III
Q_i, МДж/кг (середнє ± СВ)	34,2 ± 1,8	24,5 ± 3,1	19,7 ± 4,4
Зольність, %	4,1	7,8	12,3
Вологість, %	0,8	3,4	6,9
Вміст хлору, %	0,9	0,7	0,5
Кількість зразків, шт.	12	15	11
Коефіцієнт варіації Q_i, %	5,3	12,7	22,3

Зведений діапазон калорійності 18–38 МДж/кг (з охопленням усіх категорій) та коефіцієнт варіації 10–25 % використано як вхідні дані для імітаційного моделювання у Розділі 5. Категоризація зразків покладена в основу нечіткої бази правил підсистеми оцінювання.

В.2. Програма апробації

Основні положення дисертаційної роботи апробовано у такій послідовності:

1. науково-технічні семінари кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» — щосеместрові доповіді про хід виконання дисертаційного дослідження у 2022–2026 рр.;
2. наукова конференція-форум Ernst Lortikyan International Scientific Project «Global Creative Ideas Forum 4.0», Scientific Conference-Forum «United Perspectives 24/7», Volume 2, 2026 р. — усна доповідь;
3. обговорення результатів у рамках виконання індивідуальних планів наукової роботи аспіранта на засіданнях кафедри (2022–2026 рр.).

Окремі складові розробленої системи (комбінований каскадний регулятор, нечітка підсистема оцінювання, LSTM-модель прогнозування температурного режиму) представлено у трьох наукових публікаціях, що пройшли подвійне сліпе рецензування у фахових виданнях України категорії «Б» (DOI вказано у Додатку А). За результатами рецензування зміст відповідних розділів дисертації підтверджено як такий, що містить наукову новизну.

В.3. Готовність результатів до промислової реалізації

Розроблений програмно-алгоритмічний комплекс має модульну структуру, що дозволяє впроваджувати окремі складові поетапно. Рекомендована послідовність впровадження: (1) інтеграція нечіткої підсистеми оцінювання в режимі лише читання — без зворотного впливу на керуючі дії, для накопичення

статистики; (2) впровадження каналу випереджувальної компенсації паралельно з наявним ПІД-регулятором з можливістю оперативного переключення; (3) запуск повної системи у замкненому контурі. Така стратегія мінімізує технологічні ризики і дозволяє валідувати кожен модуль на реальних даних до повного переходу на нову схему керування.