

СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО КАСКАДНОГО РЕГУЛЯТОРА З ВИПЕРЕДЖУВАЛЬНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ ЦЕМЕНТНОЇ ПЕЧІ

Жученко О. А., д.т.н., професор кафедри технічних та програмних засобів автоматизації, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: azhuch@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5611-6529;

Гутовський Д. В., аспірант кафедри технічних та програмних засобів автоматизації, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: hytovskui@gmail.com, ORCID: 0009-0002-4141-7550.

Підвищення енергоефективності та стабілізація якості продукції є ключовими завданнями сучасної цементної промисловості, особливо в умовах широкого впровадження альтернативного палива зі змінними характеристиками. Метою даного дослідження є розробка та перевірка ефективності комбінованого каскадного регулятора з випереджувальною компенсацією для керування температурою зони спікання обертової печі. Запропонована система поєднує переваги каскадної структури зі швидким внутрішнім контуром теплового навантаження та точним зовнішнім контуром температури, а також канал випереджувальної компенсації (feedforward) головного вимірюваного збурення – калорійності альтернативного палива. На основі ідентифікованої моделі об'єкта проведено синтез параметрів ПД-регулятора методом оптимуму за модулем з подальшою корекцією на робастність. Визначено оптимальний коефіцієнт випереджувальної компенсації, що враховує дисперсію похибки оцінювання калорійності палива. Ефективність розробленого регулятора перевірена шляхом імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink з генерацією стохастичних збурень за авторегресійною моделлю. Результати моделювання для трьох сценаріїв (стаціонарний режим, зміна частки палива, підвищена варіативність) показали, що запропонований комбінований регулятор забезпечує зменшення середньоквадратичного відхилення температури зони спікання на 51,2% (з 24,8°C до 12,1°C) та скорочення часу регулювання на 34,5% порівняно з базовим ПД-регулятором. Додатково досягнуто зниження питомої витрати тепла на 2,8%. Запропонована методика синтезу та отримані результати представляють практичну цінність для проектування систем автоматизації енергоємних технологічних процесів, що працюють на паливі з нестабільними характеристиками.

Ключові слова: система автоматичного керування; комбінований регулятор; каскадна структура; випереджувальна компенсація (feedforward); цементна піч; альтернативне паливо; робастне керування; імітаційне моделювання.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.041-051

Вступ. Енергоефективність та стабільність технологічних параметрів є критичними факторами конкурентоспроможності сучасної цементної промисловості. Одним з пріоритетних напрямів зниження собівартості продукції та екологічного навантаження є масове впровадження альтернативних видів палива (АП), таких як побутові та промислові відходи, вторинні ресурси. Однак їх використання супроводжується суттєвою нестабільністю теплотехнічних характеристик, зокрема калорійності, вологості та гранулометричного складу, що є потужним джерелом збурень для системи автоматичного керування (АСУ) тепловим режимом обертової печі. Традиційні системи регулювання на основі ПД-регуляторів, розраховані на роботу з відносно стабільним паливом, часто не забезпечують необхідної якості відпрацювання таких швидкозмінних та значних за амплітудою збурень. Це призводить до відхилень температури в зоні спікання від технологічного оптимуму, погіршення якості клінкеру, підвищення питомої витрати тепла та зносу футеровки. Відтак, розробка спеціалізованих структур систем автоматичного керування, здатних ефективно компенсувати вимірювані збурення та підтримувати високі показники якості процесу, є актуальним науково-практичним завданням.

Постановка проблеми. Конкретною проблемою, що розглядається в даній роботі, є недостатня динамічна точність класичних одноконтурних та каскадних систем керування температурою зони спікання цементної печі в умовах впливу вимірюваного, але швидкозмінного збурення – калорійності альтернативного палива. Коливання калорійності призводять до миттєвих змін теплового навантаження факела, що через велику теплову інерційність печі (постійні часу до 1200 с та запізнення до 540 с) виявляється у вигляді значного та запізненого відхилення регульованої температури. Регулятор зворотного зв'язку (ПД) починає реагувати лише після виникнення відхилення, що обумовлює тривалі перехідні процеси, підвищене перерегулювання та низьку енергоефективність. Таким чином, виникає потреба в синтезі та дослідженні комбінованої системи керування, яка б інтегрувала переваги каскадної структури для покращення внутрішньої динаміки та принцип випереджувальної компенсації (feedforward) для активної компенсації головного вимірюваного збурення до його впливу на основний регульований параметр.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблемі підвищення ефективності систем автоматизації енергоємних технологічних процесів, зокрема в цементній промисловості, присвячено значну кількість наукових досліджень. Основними напрямками є вдосконалення алгоритмів керування, розробка адаптивних та робастних структур та інтеграція методів прогнозувального моделювання.

Класичним підходом до керування об'єктами з великою інерційністю та запізненням залишається використання ПД-регуляторів з різними методами налаштування [1, 2]. Для покращення динамічних характеристик широко застосовується каскадна структура, де швидкий внутрішній контур придушує основні внутрішні збурення, а зовнішній – забезпечує точність відпрацювання головного параметра [3, 4]. У контексті керування печами, дослідження [5, 6] підтверджують ефективність каскадного регулювання температури з внутрішнім контуром теплового потоку або витрати палива.

Окремим перспективним напрямом є застосування випереджувального керування (feedforward) для компенсації вимірюваних збурень. Теоретичні основи та практичні аспекти синтезу таких комбінованих систем детально розглянуті в роботах [7, 8]. Дослідження [9, 10] показують застосування feedforward-компенсації для керування складними хіміко-технологічними процесами, однак специфіка її використання для об'єктів з надвеликим транспортним запізненням, таких як цементна піч, потребує додаткового вивчення.

Інтенсивний розвиток отримали методи модельно-прогнозуючого керування (MPC), які демонструють високу ефективність для багатовимірних об'єктів з обмеженнями [11, 12]. Їх впровадження в цементній промисловості, зокрема для оптимізації спалювання альтернативного палива, описане в роботах [13, 14]. Однак складність моделювання, висока обчислювальна складність та потреба в потужній апаратній базі часто обмежують їх широке промислове застосування, створюючи нішу для більш простих, але ефективних комбінованих структур на базі ПД-регуляторів.

Питанням адаптації систем керування до нестационарних характеристик паливних сумішей, зокрема альтернативних, присвячені роботи [15, 16], де запропоновано використовувати онлайн-оцінки калорійності. Дослідження робастності систем керування печами представлені в [17, 18].

Попри значний прогрес, недостатньо дослідженим залишається питання синтезу та практичної реалізації комбінованих структур, які б оптимально інтегрували переваги каскадної динаміки та випереджувальної компенсації саме для класу об'єктів з екстремально великою інерційністю та запізненням, що працюють на паливі з швидкозмінними характеристиками. Зокрема, вимагає уточнення метод визначення оптимального коефіцієнта компенсації з урахуванням похибки оцінки збурень та формалізація процедури налаштування всієї багатоконтурної системи для досягнення гарантованих показників робастної якості та енергоефективності. Саме цим аспектам присвячена дана стаття.

Мета та задачі дослідження. Метою даного дослідження є синтез комбінованого каскадного регулятора з випереджувальною компенсацією для системи автоматичного

керування температурою зони спікання цементної печі та комплексна експериментально-імітаційна оцінка його ефективності в умовах впливу збурень від змінної калорійності альтернативного палива.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні конкретні завдання:

1. Провести формалізацію вимог до системи керування тепловим режимом із позицій технологічних обмежень, динамічної якості, робастності та енергоефективності.

2. Синтезувати структуру комбінованої системи керування, що інтегрує каскадний контур регулювання температури з контуром випереджувальної компенсації (feedforward) головного вимірюваного збурення.

3. Розробити методику синтезу параметрів регуляторів комбінованої системи: коефіцієнтів каскадного ПІД-регулятора зовнішнього контуру та оптимального коефіцієнта випереджувальної компенсації з урахуванням точності оцінки збурень.

4. Розробити дискретний алгоритм функціонування комбінованого регулятора з механізмами антинасичення та обмеження швидкості зміни керуючих впливів, придатний для реалізації в промисловому контролері.

5. Провести імітаційне моделювання динаміки замкненої системи керування зі стохастичними збуреннями для порівняльної оцінки якості регулювання та енергоефективності запропонованої комбінованої стратегії відносно базових підходів.

6. Кількісно оцінити ефективність запропонованого рішення через показники якості регулювання (середньоквадратичне відхилення, час регулювання, перерегулювання) та економію енергоресурсів.

Основу методології дослідження становлять методи теорії автоматичного керування (синтез регуляторів, принцип компенсації збурень), математичного моделювання динамічних систем та статистичного аналізу результатів імітаційних експериментів.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження є канал «витрата традиційного палива – температура зони спікання» обертової цементної печі. Його динаміка апроксимована передавальною функцією другого порядку з транспортним запізненням:

$$W_{obj}(s) = \frac{K_{obj}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} e^{-\theta s},$$

де K_{obj} – коефіцієнт підсилення об'єкта, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{с} / \text{кг}$; τ_1 , τ_2 – постійні часу об'єкта, с; θ – транспортне запізнення, с; s – оператор Лапласа.

На основі технологічних норм для процесу випалу клінкеру сформульовані вимоги до системи керування. Температура зони спікання T_{zone} має підтримуватися в діапазоні:

$$1420 \leq T_{zone} \leq 1480 \quad [^{\circ}\text{C}],$$

із заданим усталеним значенням $T_{zone, nom} = 1420 \text{ } ^{\circ}\text{C}$. Допустиме середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_{T_{zone}} \leq 15 \quad [^{\circ}\text{C}].$$

Динамічні вимоги включають час регулювання $t_s^{zone} \leq 45 \text{ хв}$, перерегулювання $\kappa \leq 15\%$ та статичну похибку $e_{ss}^{zone} \leq 5 \text{ } ^{\circ}\text{C}$. Система повинна бути робастною до варіацій параметрів об'єкта в діапазонах: $\Delta K_{obj} \in [-30\%, +30\%]$, $\Delta \theta \in [-20\%, +20\%]$.

Структура комбінованого каскадного регулятора з випереджувальною компенсацією.

Для задоволення вимог запропоновано структуру, що поєднує каскадний контур зворотного зв'язку та контур випереджувальної компенсації.

Каскадний контур складається з:

1. Зовнішнього (повільного) контуру на основі ПІД-регулятора $R_1(s)$, який керує температурою T_{zone} . Його вихід $Q_{ref}(t)$ є завданням для внутрішнього контуру.

2. Внутрішнього (швидкого) контуру на основі П-регулятора R_2 , який керує сумарним тепловим навантаженням $Q_{comb}(t)$ шляхом зміни витрати традиційного палива $V_{TF}(t)$. Теплове навантаження розраховується як:

$$Q_{\text{comb}}(t) = B_{\text{TF}}(t) \cdot Q_i^{\text{TF}} + B_{\text{AF}}(t) \cdot \hat{Q}_i^{\text{AF}}(t),$$

де Q_i^{TF} – калорійність традиційного палива, МДж/кг; $B_{\text{AF}}(t)$ – витрата альтернативного палива, кг/с; $\hat{Q}_i^{\text{AF}}(t)$ – оцінка його калорійності, МДж/кг.

Контур випереджувальної компенсації формує коригуючий вплив $u_{\text{ff}}(t)$ на основі вимірюваного збурення – калорійності альтернативного палива. Сумарний керуючий вплив на об'єкт:

$$u(t) = u_{\text{PID}}(t) + u_{\text{ff}}(t),$$

де $u_{\text{PID}}(t)$ – вихід каскадного ПІД-регулятора.

Синтез параметрів каскадного ПІД-регулятора. Передатна функція ПІД-регулятора зовнішнього контуру:

$$W_{\text{PID}}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_f s + 1} \right),$$

де K_p – пропорційний коефіцієнт; T_i – постійна часу інтегрування, с; T_d – постійна часу диференціювання, с; $T_f = T_d/10$ – постійна часу фільтра диференціальної складової, с.

Початкові налаштування отримано методом оптимуму за модулем для моделі (5.1):

$$K_p^0 = \frac{\tau_\Sigma}{K_{\text{obj}} \cdot 2 \cdot \theta}, \quad T_i^0 = \tau_\Sigma, \quad T_d^0 = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_\Sigma},$$

де $\tau_\Sigma = \tau_1 + \tau_2$.

Для підвищення робастності введено коефіцієнт детюнінгу δ :

$$\delta = 1 + 0.5 \cdot \frac{\theta}{\tau_\Sigma}.$$

Кінцеві параметри регулятора:

$$K_p = \frac{K_p^0}{\delta}, \quad T_i = T_i^0 \cdot \delta, \quad T_d = \frac{T_d^0}{\delta}.$$

Для ідентифікованих параметрів ($K_{\text{obj}} = 285 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с}/\text{кг}$, $\tau_1 = 420 \text{ с}$, $\tau_2 = 780 \text{ с}$, $\theta = 540 \text{ с}$) отримано: $K_p = 0.0032 \text{ (кг/с)/}^\circ\text{C}$, $T_i = 1470 \text{ с}$, $T_d = 223 \text{ с}$, що забезпечує запаси стійкості $\varphi_m \approx 52^\circ$, $A_m \approx 8.9 \text{ дБ}$.

Синтез коефіцієнта випереджувальної компенсації.

Компенсуючий вплив:

$$u_{\text{ff}}(t) = K_{\text{ff}} \cdot B_{\text{AF}}(t) \cdot \frac{\hat{Q}_i^{\text{AF}}(t) - Q_{i,\text{ref}}^{\text{AF}}}{Q_i^{\text{TF}}},$$

де K_{ff} – коефіцієнт компенсації; $Q_{i,\text{ref}}^{\text{AF}}$ – референтна калорійність альтернативного палива, МДж/кг.

За наявності похибки оцінки $\varepsilon_Q(t) = \hat{Q}_i^{\text{AF}}(t) - Q_i^{\text{AF}}(t)$ оптимальне значення K_{ff} , що мінімізує дисперсію помилки регулювання, визначається як:

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

де σ_Q^2 – дисперсія калорійності палива; σ_ε^2 – дисперсія похибки оцінки.

Для $\sigma_Q = 3.3 \text{ МДж/кг}$ та $\sigma_\varepsilon = 2.0 \text{ МДж/кг}$ розрахунок дає $K_{\text{ff}}^{\text{opt}} = 0.73$.

Дискретний алгоритм функціонування регулятора.

Для реалізації в ПЛК розроблено дискретний алгоритм (крок $\Delta t = 1 \text{ с}$). Основним є рівняння для інтегральної складової з механізмом anti-windup (back-calculation):

$$I(k) = I(k-1) + \frac{K_p \Delta t}{T_i} e(k) + \frac{\Delta t}{T_t} (u_{\text{sat}}(k-1) - u(k-1)),$$

де $I(k)$ – інтегральна складова на k -му кроці; $e(k)$ – помилка регулювання; u_{sat} – обмежений вихід регулятора; u – необмежений вихід; $T_t = \sqrt{T_i T_d}$ – постійна часу відстеження.

Методика імітаційного моделювання.

Ефективність системи оцінювалась шляхом порівняння трьох стратегій у MATLAB/Simulink:

- Стратегія А: Базовий ПД-регулятор.
- Стратегія Б: Каскадний ПД-регулятор.
- Стратегія В: Запропонована комбінована система (каскадний ПД + feedforward).

Збурення калорійності генерувалось як авторегресійний процес AR(1):

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

де $\bar{Q}_i^{\text{AF}}$ – середня калорійність, МДж/кг; ρ – коефіцієнт кореляції; $\varepsilon(k)$ – білий шум.

Основні результати та їх обговорення.

Ефективність запропонованої комбінованої системи керування (Стратегія В) оцінювалась у порівнянні з двома базовими підходами (А та Б) за трьома сценаріями моделювання. Критеріями порівняння були: якість регулювання (середньоквадратичне відхилення σ , час регулювання t_s , перерегулювання κ), енергоефективність (питома витрата тепла $q_{\text{спес}}$) та робастність. Результати представлені на рисунку 1.

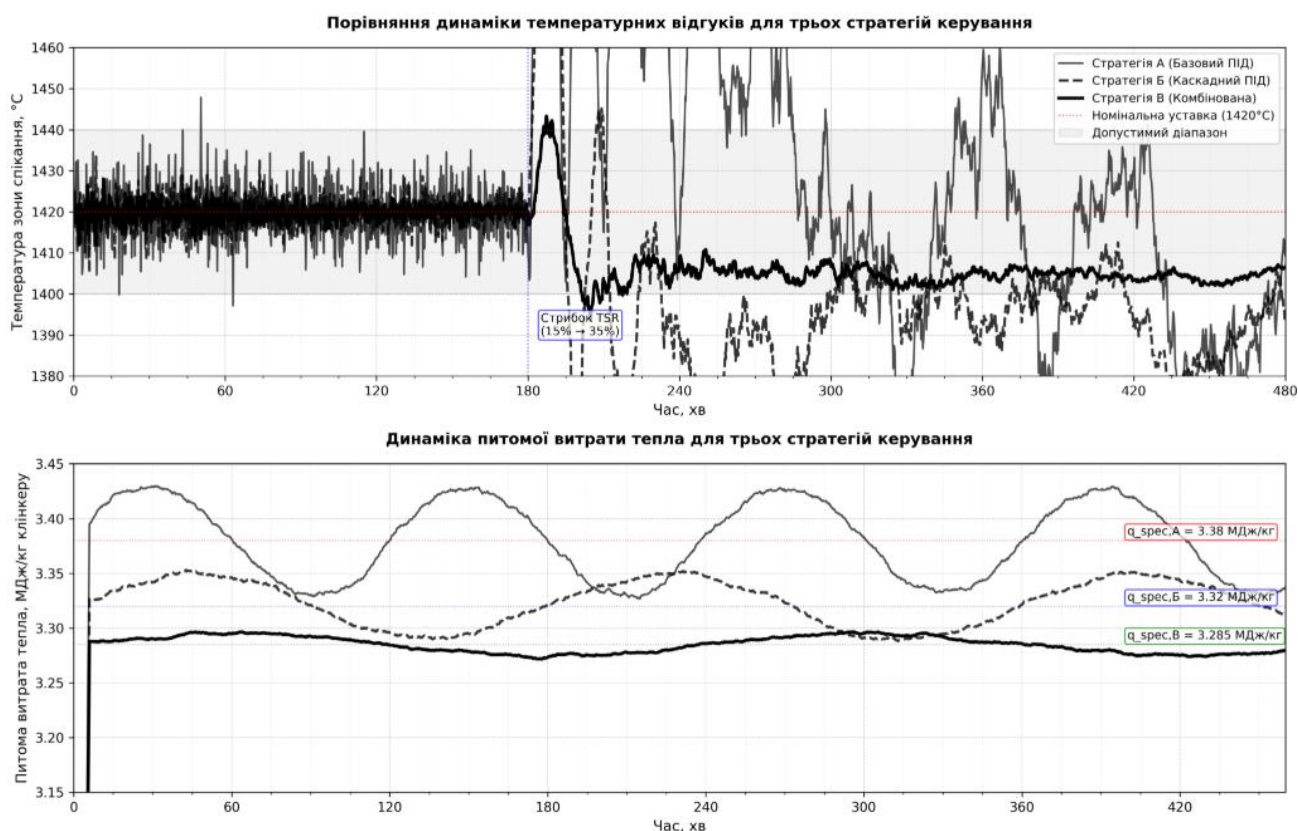


Рисунок 1 – Результати імітаційного моделювання комбінованої системи керування

У стаціонарному режимі з коефіцієнтом термічного заміщення 25% та варіативністю калорійності палива $CV_Q = 15\%$ отримано такі результати (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняльні показники якості регулювання для трьох стратегій керування (стаціонарний режим)

Показник	Стратегія А (Базовий ПІД)	Стратегія Б (Каскадний ПІД)	Стратегія В (Комбінована)
Середнє значення T_{zone} , °C	1419.2	1420.1	1420.0
Середньоквадратичне відхилення σ_T , °C	24.8	16.3	12.1
Максимальне відхилення $T_{max} - T_{min}$, °C	116	77	57
Час регулювання t_s , хв	58	48	38
Перерегулювання κ , %	12	9	7
Питома витрата тепла q_{spres} , МДж/кг	3.38	3.32	3.285

Аналіз даних табл. 1 показує, що запропонована комбінована стратегія В забезпечує найвищу точність та стабільність. Середньоквадратичне відхилення температури зони спікання σ_T знизилось на 34.3% порівняно з каскадною стратегією Б та на 51.2% порівняно з базовою стратегією А. Це є прямим наслідком введення випереджувальної компенсації, яка активно придушує збурення від калорійності палива до їх впливу на температуру. Динамічна якість також покращилась: час регулювання скоротився на 34.5%, а перерегулювання – на 41.7% відносно базового ПІД-регулятора.

Ефективність контуру feedforward залежить від точності оцінки калорійності альтернативного палива. Результати параметричного дослідження цієї залежності представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Вплив похибки оцінювання калорійності на ефективність випереджувальної компенсації

Відносна похибка оцінки, $\delta_Q = \sigma_\varepsilon / \sigma_Q$, %	Коефіцієнт ефективності компенсації, η_{ff}	Середньоквадратичне відхилення σ_T , °C
0 (ідеальна оцінка)	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 (наявність лише ПІД)	0	24.8

Коефіцієнт ефективності компенсації розраховувався як $\eta_{ff} = 1 - (\sigma_T^{ff} / \sigma_T^{base})$. Дані таблиці 2 підтверджують, що навіть за значної похибки оцінки (до 50–60%) механізм feedforward забезпечує помітне покращення якості ($\eta_{ff} > 0.28$). Це обґрунтовує практичну реалізованість запропонованого підходу, враховуючи, що сучасні системи онлайн-аналізу палива забезпечують похибку на рівні 20–30%.

Для оцінки динамічних можливостей системи досліджено сценарій із ступінчастою зміною частки альтернативного палива (TSR) від 15% до 35%. Комбінована стратегія В продемонструвала найкращі результати: час виходу на новий усталений режим становив 38 хв (проти 58 хв у стратегії А), а максимальне динамічне відхилення температури не перевищило 28 °C (проти 45 °C).

У режимі з підвищеною варіативністю палива ($CV_Q = 25\%$) комбінована система показала високу робастність. Середньоквадратичне відхилення σ_T склало 18.7 °C, що на 51.4% менше, ніж у базового ПІД-регулятора (38.5 °C). Частота виходу температури за технологічні межі (1400–1440°C) знизилась з 12.3% до 2.1% часу роботи.

Впровадження комбінованої системи керування дозволяє знизити середню питому витрату тепла на випал клінкеру з 3.38 МДж/кг (Стратегія А) до 3.285 МДж/кг (Стратегія В), що становить економію 2.8%. Для типової печі продуктивністю 3000 тонн клінкеру на добу це відповідає зменшенню річних витрат теплової енергії на приблизно 95 000 ГДж. За середньої вартості паливного еквівалента 150 грн/ГДж, річний економічний ефект може сягати 14.1 млн грн.

Обговорення результатів. Отримані результати однозначно підтверджують гіпотезу про те, що інтеграція випереджувальної компенсації вимірюваних збурень у класичну каскадну структуру є ефективним засобом для підвищення якості, швидкодії та енергоефективності систем керування інерційними об'єктами. Ключовим аспектом є правильний вибір коефіцієнта компенсації K_{ff} , який повинен враховувати не лише динаміку каналів, а й точність інформації про збурення. Запропонована формула для його розрахунку на основі дисперсійного аналізу показала свою адекватність.

Основні переваги запропонованого рішення:

1. Значне підвищення точності за рахунок випереджувальної компенсації головного збурення.
2. Поліпшення динаміки через розділення завдань між швидким (потік тепла) і повільним (температура) контурами.
3. Підвищення робастності, оскільки feedforward-компенсація зменшує навантаження на ПІД-регулятор і, відповідно, його чутливість до змін параметрів об'єкта.
4. Досяжність енергозбереження шляхом більш стабільного режиму роботи печі ближче до технологічного оптимуму.

Головним обмеженням є необхідність наявності достатньо точної та швидкої оцінки калорійності альтернативного палива, що може вимагати додаткового вимірювального обладнання.

Висновки. На основі проведеного дослідження синтезу та імітаційного аналізу комбінованої системи керування тепловим режимом цементної печі можна зробити такі основні висновки:

1. Синтезовано структуру комбінованого каскадного регулятора з випереджувальною компенсацією для керування температурою зони спікання. Запропонована архітектура інтегрує переваги каскадної динаміки (внутрішній швидкий контур теплового навантаження, зовнішній точний контур температури) та принципу активної компенсації вимірюваних збурень (feedforward-компенсація калорійності альтернативного палива), що є новим підходом для даного класу об'єктів.

2. Розроблено методiku синтезу параметрів регулятора, яка включає:

- Визначення налаштувань каскадного ПІД-регулятора ($K_p = 0.0032$ (кг/с)/°C, $T_i = 1470$ с, $T_d = 223$ с) методом оптимуму за модулем з подальшою корекцією на робастність (коефіцієнт детюнінгу $\delta = 1.225$), що забезпечило запаси стійкості $\phi_m \approx 52^\circ$, $A_m \approx 8.9$ дБ.

- Аналітичне визначення оптимального коефіцієнта випереджувальної компенсації $K_{ff}^{opt} = 0.73$ на основі співвідношення дисперсій калорійності палива та похибки її оцінки.

3. Результати імітаційного моделювання підтвердили значну ефективність запропонованої системи порівняно з базовими підходами. Для стаціонарного режиму досягнуто:

- Зниження середньоквадратичного відхилення температури на 51.2% (з 24.8°C до 12.1°C).
- Скорочення часу регулювання на 34.5% (з 58 хв до 38 хв).
- Зменшення питомої витрати тепла на 2.8% (з 3.38 до 3.285 МДж/кг).

4. Встановлено, що запропонована система володіє підвищеною робастністю. При підвищеній варіативності палива ($CV_Q = 25\%$) вона забезпечує зниження σ_T на 51.4% та зменшення ймовірності виходу за технологічні межі з 12.3% до 2.1% часу роботи, що підтверджує її працездатність у реальних умовах нестабільного паливного потоку.

5. Оцінено потенційний економічний ефект від впровадження. Для печі продуктивністю 3000 т/добу річна економія може сягати 14.1 млн грн за рахунок зменшення витрати теплової енергії та підвищення стабільності якості клінкеру.

Отже, розроблена комбінована система керування є ефективним інструментом для підвищення енергоефективності та технологічної стабільності роботи цементних печей, що використовують альтернативне паливо зі змінними характеристиками. Результати дослідження мають практичну цінність для проєктування та модернізації систем автоматизації енергоємних виробництв.

Перспективи подальших досліджень. Отримані результати відкривають низку перспективних напрямів для подальших наукових та прикладних досліджень:

1. Розробка та впровадження більш точних методів онлайнної оцінки калорійності альтернативного палива. Подальше підвищення ефективності feedforward-компенсації напряму залежить від точності та швидкодії визначення $\hat{Q}_i^{AF}(t)$. Перспективним є застосування спектроскопічних методів або швидкісних калориметрів, інтегрованих з системою керування.

2. Перехід до повністю адаптивної структури керування. Запропонований регулятор має фіксовані параметри, оптимізовані для певного діапазону змін. Розширенням може бути розробка адаптивної системи, яка в реальному часі оцінює ефективні параметри об'єкта (коефіцієнт підсилення, постійні часи) при зміні складу паливної суміші та автоматично коригує налаштування K_p , T_i , T_d та K_{ff} .

3. Інтеграція комбінованого регулятора у структуру модельно-прогнозуючого керування (МРС) верхнього рівня. Запропонована комбінована система може виконувати роль швидкодіючого, робастного нижнього рівня керування. Для оптимізації економічних показників всього агрегату (піч-декарбонізатор-холодильник) перспективним є її підпорядкування координованому МРС-оптимізатору верхнього рівня, який би визначав оптимальні уставки температури та розподіл палива.

4. Експериментальна апробація алгоритму на фізичній моделі (hardware-in-the-loop) або промисловому об'єкті. Наступним обов'язковим кроком є перевірка працездатності розробленого алгоритму в умовах, максимально наближених до реальних, з використанням програмованого логічного контролера (ПЛК) та емуляції динаміки печі.

Реалізація цих напрямів дозволить створити нове покоління інтелектуальних систем автоматизації для вітчизняної економіки, здатних ефективно та стабільно використовувати широкий спектр вторинних енергоресурсів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Li X., Wang M., Wang K., Liu Z. & Li G. Converter inlet temperature control in flue gas acid-making process based on equivalent input disturbance and model prediction. *Optimal control Applications and Methods*, 44(4), 2093–2111. 2023. <https://doi.org/10.1002/oca.2967>.
2. Wang T., Li D., Kan Z., Yuan L., Ma K., & Xiang J. Feedforward compensation control method designed for gust alleviation of aircraft with large aspect ratio. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering*, 239(14), 2000–2009. 2025. <https://doi.org/10.1177/09544100251346058>.
3. Ning X., Huang W., Xu G., Wang Z., Wu B., Zheng L. & Xu B. A Novel Model-Based Adaptive Feedforward-Feedback Control Method for Real-Time Hybrid Simulation considering Additive Error Model. *Structural control and Health Monitoring*, 2023, 1–25. <https://doi.org/10.1155/2023/5550580>.
4. Bae J., Kim K., Chu S., Heo J., Lim S. & Sung S. Development of an Antiwindup Technique for a Cascade Control System. *Acs Omega*, 5(50), 32597–32607. 2020. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04927>.

5. Ye W., Zhong S., Shen Y., Zhang X. & Wang Y. Predictive Control Scheme for Fuel Cell Air Compressor Efficiency Enhancement with Surge- and Choke-Constrained Awareness. *Advanced Theory and Simulations*, 7(6). 2024. <https://doi.org/10.1002/adts.202400284>.
6. Jiang X. Data-Driven Modeling and Predictive Control of a High-Quality Special Steel Electrosag Remelting Process with Time Delay. *Acs Omega*, 10(42), 50349–50358. 2025. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c07415>.
7. Dehkordi M. and Danesh M. Fuzzy control allocation of a positionable rotor quadrotor based on log-barrier optimization and propulsion system fault toleration. *Iet control Theory and Applications*, 18(9), 1176–1190. 2024. <https://doi.org/10.1049/cth2.12653>.
8. Karlsson I., Rootzén J., Toktarova A., Odenberger M., Johnsson F. & Göransson L. Roadmap for Decarbonization of the Building and Construction Industry—A Supply Chain Analysis Including Primary Production of Steel and Cement. *Energies*, 13(16), 4136. 2020. <https://doi.org/10.3390/en13164136>.
9. Rahman H. and Hidayaturrahman C. Analysis of electrostatic precipitators plate-wire type in reducing dust emissions for sustainable environment. *Sustinere Journal of Environment and Sustainability*, 7(1), 1–14. 2023. <https://doi.org/10.22515/sustinerejes.v7i1.295>.
10. Чуб І. М., Пічка Д. С. Система автоматизованого управління виробництвом цементу. Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті: матеріали XX Міжнар. форуму молоді, 4–5 квіт. 2024 р. Харків: ДБТУ. С. 251.
11. Bisulandu B. and Huchet F. Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications. *Applied Thermal Engineering*, 221, 119637. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119637>.
12. Silva T., Paula M., Silva W. & Lacorte G. Deposition of Potentially Toxic Metals in the Soil from Surrounding Cement Plants in a Karst Area of Southeastern Brazil. *Conservation*, 1(3), 137–150. 2021. <https://doi.org/10.3390/conservation1030012>.
13. Öztürk B., Öztürk O. & Karademir A. NOx emission modeling at cement plants with co-processing alternative fuels using ANN. *Environmental Engineering Research*, 27(5), 210277-0. 2022. <https://doi.org/10.4491/eer.2021.277>.
14. Moreno A., Castán-Lascorz M. & Tavares V. An Industrial-Scale Cement Rotary Kiln CFD Model to Characterise Alternative Fuel Combustion Profiles., 448–459. 2023. <https://doi.org/10.52202/069564-0041>.
15. Urbano J., Henríquez J., Ochoa Á., Primo A. & Souza A. Dynamic modeling of the heat transfer process in rotary kilns with indirect oil heating: Parametric analysis of gypsum calcination case. *Thermal Science*, 26(2 Part C), 1637Ö1648. 2022. <https://doi.org/10.2298/tsci210523245u>.
16. Manis O., Skoumperdis M., Kioroglou C., Tzilopoulos D., Ouzounis M., Loufakis M. & Stankovski M. Data Driven AI Models within a User-Defined Optimization Objective Function in Cement Production. 2023. <https://doi.org/10.20944/preprints202312.1328.v1>.
17. Sutawijaya A. and Kayi A. Optimizing the clinker production by using an automation model in raw material feed. *International Journal of Industrial Optimization*, 2(1), 17. 2021. <https://doi.org/10.12928/ijio.v2i1.3002>.
18. Tabares J., McGinley W., Druffel T. & Bhagwat B. Experimental validation of multiphysics model simulations of the thermal response of a cement clinker rotary kiln at laboratory scale. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, 4(4). 2022. <https://doi.org/10.1002/amp2.10134>.

REFERENCES

1. Li, X., Wang, M., Wang, K., Liu, Z., & Li, G. (2023). Converter inlet temperature control in flue gas acid-making process based on equivalent input disturbance and model prediction. *Optimal control Applications and Methods*, 44(4), 2093–2111. <https://doi.org/10.1002/oca.2967>.
2. Wang, T., Li, D., Kan, Z., Yuan, L., Ma, K., & Xiang, J. (2025). Feedforward compensation control method designed for gust alleviation of aircraft with large aspect ratio.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering, 239(14), 2000–2009. <https://doi.org/10.1177/09544100251346058>.

3. Ning, X., Huang, W., Xu, G., Wang, Z., Wu, B., Zheng, L., & Xu, B. (2023). A Novel Model-Based Adaptive Feedforward-Feedback Control Method for Real-Time Hybrid Simulation considering Additive Error Model. *Structural control and Health Monitoring*, 1–25. <https://doi.org/10.1155/2023/5550580>.

4. Bae, J., Kim, K., Chu, S., Heo, J., Lim, S., & Sung, S. (2020). Development of an Antiwindup Technique for a Cascade Control System. *Acs Omega*, 5(50), 32597–32607. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04927>.

5. Ye, W., Zhong, S., Shen, Y., Zhang, X., & Wang, Y. (2024). Predictive Control Scheme for Fuel Cell Air Compressor Efficiency Enhancement with Surge- and Choke-Constrained Awareness. *Advanced Theory and Simulations*, 7(6). <https://doi.org/10.1002/adts.202400284>.

6. Jiang, X. (2025). Data-Driven Modeling and Predictive Control of a High-Quality Special Steel Electroslag Remelting Process with Time Delay. *Acs Omega*, 10(42), 50349–50358. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c07415>.

7. Dehkordi, M. and Danesh, M. (2024). Fuzzy control allocation of a positionable rotor quadrotor based on log-barrier optimization and propulsion system fault toleration. *Iet control Theory and Applications*, 18(9), 1176–1190. <https://doi.org/10.1049/cth2.12653>.

8. Karlsson, I., Rootzén, J., Toktarova, A., Odenberger, M., Johnsson, F., & Göransson, L. (2020). Roadmap for Decarbonization of the Building and Construction Industry—A Supply Chain Analysis Including Primary Production of Steel and Cement. *Energies*, 13(16), 4136. <https://doi.org/10.3390/en13164136>.

9. Rahman, H. and Hidayaturrehman, C. (2023). Analysis of electrostatic precipitators plate-wire type in reducing dust emissions for sustainable environment. *Sustinere Journal of Environment and Sustainability*, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10.22515/sustinerejes.v7i1.295>.

10. Chub, I. M., Pichka, D. S. (2024). Systema avtomatyzovanoho upravlinnia vyrobnytstvom tsementu. *Molod i industriia 4.0 v XXI stolitti: materialy KhKh Mizhnar. forumu molodi*, 4–5 kvit. Kharkiv: DBTU, 2024. S. 251.

11. Bisulandu, B. and Huchet, F. (2023). Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications. *Applied Thermal Engineering*, 221, 119637. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119637>.

12. Silva, T., Paula, M., Silva, W., & Lacorte, G. (2021). Deposition of Potentially Toxic Metals in the Soil from Surrounding Cement Plants in a Karst Area of Southeastern Brazil. *Conservation*, 1(3), 137–150. <https://doi.org/10.3390/conservation1030012>

13. Öztürk, B., Öztürk, O., & Karademir, A. (2021). NOx emission modeling at cement plants with co-processing alternative fuels using ANN. *Environmental Engineering Research*, 27(5), 210277–0. <https://doi.org/10.4491/eer.2021.277>.

14. Moreno, A., Castán-Lascorz, M., & Tavares, V. (2023). An Industrial-Scale Cement Rotary Kiln CFD Model to Characterise Alternative Fuel Combustion Profiles., 448–459. <https://doi.org/10.52202/069564-0041>.

15. Urbano, J., Henríquez, J., Ochoa, Á., Primo, A., & Souza, A. (2022). Dynamic modeling of the heat transfer process in rotary kilns with indirect oil heating: Parametric analysis of gypsum calcination case. *Thermal Science*, 26(2 Part C), 1637–1648. <https://doi.org/10.2298/tsci210523245u>.

16. Manis, O., Skoumperdis, M., Kioroglou, C., Tzilopoulos, D., Ouzounis, M., Loufakis, M., & Stankovski, M. (2023). Data Driven AI Models within a User-Defined Optimization Objective Function in Cement Production.. <https://doi.org/10.20944/preprints202312.1328.v1>.

17. Sutawijaya, A. and Kayi, A. (2021). Optimizing the clinker production by using an automation model in raw material feed. *International Journal of Industrial Optimization*, 2(1), 17. <https://doi.org/10.12928/ijio.v2i1.3002>.

18. Tabares, J., McGinley, W., Druffel, T., & Bhagwat, B. (2022). Experimental validation of multiphysics model simulations of the thermal response of a cement clinker rotary kiln at laboratory scale. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, 4(4). <https://doi.org/10.1002/amp2.10134>.

Zhuchenko O. A., Gutovsky D. V. SYNTHESIS AND RESEARCH OF A COMBINED CASCADE REGULATOR WITH ADVANCED COMPENSATION FOR CONTROLLING THE THERMAL MODE OF A CEMENT FURNACE

Improving energy efficiency and stabilizing product quality are critical challenges for the modern cement industry, especially with the widespread adoption of alternative fuels with highly variable characteristics. This study aims to develop and validate a combined cascade controller with feedforward compensation for controlling the sintering zone temperature of a rotary cement kiln. The proposed system integrates the advantages of a cascade structure, featuring a fast inner heat load loop and a precise outer temperature loop, with a feedforward channel that actively compensates for the main measured disturbance—the calorific value of alternative fuel.

The research is based on a dynamic model of the kiln's "fuel flow - temperature" channel, approximated as a second-order transfer function with a significant time delay. The control requirements were formalized considering technological constraints, dynamic performance, robustness, and energy efficiency. The synthesis of the combined controller involved two key steps: (1) tuning the parameters of the cascade PID controller using the modulus optimum method with subsequent detuning for robustness, resulting in parameters $K_p = 0.0032 \text{ (kg/s)/}^\circ\text{C}$, $T_i = 1470 \text{ s}$, $T_d = 223 \text{ s}$, which provide stability margins of $\phi_m \approx 52^\circ$ and $A_m \approx 8.9 \text{ dB}$; (2) determining the optimal feedforward compensation coefficient $K_{ff}^{opt} = 0.73$ based on a variance analysis that accounts for errors in estimating the fuel's calorific value. A discrete control algorithm suitable for implementation in an industrial PLC was developed, incorporating anti-windup mechanisms and rate-of-change limits.

The effectiveness of the proposed control system (Strategy C) was evaluated through simulation in MATLAB/Simulink and compared with two baseline strategies: a single-loop PID controller (Strategy A) and a cascade PID controller without feedforward compensation (Strategy B). Stochastic disturbances in fuel calorific value were generated using a first-order autoregressive (AR1) model. Simulations covered three operational scenarios: steady-state operation, step change in alternative fuel share, and high fuel variability conditions.

The results demonstrate the superior performance of the combined feedforward-feedback strategy. In the steady-state regime, it reduced the root-mean-square deviation of temperature by 51.2% (from 24.8°C to 12.1°C) and the settling time by 34.5% (from 58 min to 38 min) compared to the basic PID controller. The overshoot was also minimized. Furthermore, the specific heat consumption decreased by 2.8%, from 3.38 MJ/kg to 3.285 MJ/kg. In the high-variability scenario ($CV = 25\%$), the combined system showed enhanced robustness, maintaining a temperature standard deviation of 18.7°C , which is 51.4% lower than the basic controller. The economic impact was estimated, showing potential annual fuel cost savings of up to UAH 14.1 million for a kiln with a capacity of 3000 tons of clinker per day.

The study confirms that integrating feedforward compensation of measurable disturbances into a cascade control structure is a highly effective approach for enhancing control quality, dynamic response, and energy efficiency in processes with large inertia and delay, operating on fuels with unstable characteristics. The proposed methodology for controller synthesis and the obtained results are of significant practical value for designing automation systems in energy-intensive industries transitioning to circular economy models.

Key words: automatic control system; combined controller; cascade control; feedforward compensation; cement kiln; alternative fuel; robust control; simulation modeling.

© Жученко О. А., Гутовський Д. В.

Статтю прийнято до редакції 06.12.2025