

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 681.5

ЖУЧЕНКО А. І.*, ПУТЯТІН Р. О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАДАЧА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

За результатами аналізу існуючих систем керування процесом випалювання вуглецевих виробів вуглеграфітового виробництва показана доцільність використання модельно-прогнозуючого керування. Розглянуті обмеження, які мають бути накладені на керування для забезпечення, з одного боку, потрібної тривалості процесу випалювання для досягнення усіма заготовками необхідних кондицій, а, з другого боку, запобігання перегрівання заготовок, що призводить до підвищення допустимого перепаду температур у заготовках, а, значить, до браку продукції. Дане математичне формулювання задачі керування, метою якого є підвищення енергоефективності процесу випалювання з урахуванням конструкційних та технологічних обмежень.

Ключові слова: оптимальне керування, МП-регулятор, ідентифікація, модель другого порядку, випалювання, вуглеграфітові вироби.

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2023.294325

*Corresponding author: zhaniv@ukr.net

Received 23 November 2023; Accepted 30 November 2023

Постановка проблеми. Вуглеграфітові вироби застосовують у різних галузях техніки, зокрема в чорній та кольоровій металургії, які є визначальними в економіці України. Випалювання є одним із завершальних етапів виробництва вуглеграфітових виробів. Цей етап є одним із найбільш тривалих (тривалість всієї кампанії випалювання становить сотні годин), інерційних і енерговитратних в усьому циклі виробництва.

Найбільш поширеним типом печі є кільцева піч типу «Рідгаммер». Вона складається з кількох однакових камер (порядку 10–20), кожна з яких може містити вуглеграфітові заготовки. Піч обладнана рухомим газовим пальником, який послідовно пересувають від камери до камери. Камера, на якій наразі розміщено пальник – камера «під вогнем» – має найвищу температуру, яка в кінці процесу досягає 1300 °С. Кілька наступних камер (на яких пальник було розміщено раніше) охолоджують свіжим повітрям, яке потім надходить як джерело кисню в камеру «під вогнем». Димові гази з останньої подають в наступні камери (на які пальник буде перенесено згодом) для їхнього нагрівання.

Через тепломеханічні напруження, які виникають у заготовках внаслідок неоднорідності нагрівання, існує ризик утворення тріщин – така продукція буде бракованою. Це накладає обмеження на швидкість зміни теплового режиму на всіх стадіях випалювання, й опосередковано накладає обмеження на керування.

Рівень автоматизації керування цим процесом є наразі недостатнім, що призводить до необхідності продовжувати дослідження й розробки в цьому напрямі.

Процес випалювання вуглецевих виробів характеризується значними енергетичними затратами. Навіть незначна їх економія призводить до суттєвого економічного ефекту. Саме тому підвищення ефективності даного технологічного процесу шляхом створення енергоощадних систем керування ним є актуальною науково-практичною задачею.

Крім того, суттєвим обмеженням на швидкість нагрівання заготовок у процесі їх випалювання, а значить, на тривалість даного процесу, є вимоги щодо допустимого перепаду температур у заготовках. Найбільше зростання перепаду температур і найбільші його абсолютні значення, як показали проведені дослідження, спостерігається у камері «під вогнем». Ця обставина обумовлює доцільність з точки зору урахування обмежень на перепад температур у заготовках при розробленні системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів не розглядати всі камери печі, а лише камеру «під вогнем».

Розробленню будь-якої системи керування, у тому числі системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів, передує важливий етап - постановка задачі керування.

Аналіз попередніх досліджень. Останнім часом зріс інтерес до технологічних процесів виробництва вуглеграфітової продукції, зокрема випалювання. Проблеми науково обґрунтованих регламентів досліджено у дисертаційних роботах [1, 2]. В них було визначено обмеження на швидкість нагрівання заготовок на різних етапах випалювання.

В працях [3–6] за допомогою імітаційного моделювання досліджено вплив розрідження в газовій камері печі, надлишку повітря, температури повітря та витрати палива на динаміку й просторовий розподіл температури в пересипці й заготовках на різних стадіях випалювання. Результати показують, що перепад температури в заготовках значно відрізняється на різних стадіях процесу. Найменший перепад температури спостерігається при нагріванні заготовок димовими газами, при охолодженні заготовок повітрям перепад збільшується, найбільший – безпосередньо при випалюванні в камері «під вогнем», де спалюють паливо.

Спрощену математичну модель випалювання, отриману на основі методу Фур'є, придатну для використання в системі автоматичного керування, побудовано в [7]. Структура та параметри запропонованої моделі підлягають уточненню для урахування особливостей конкретного технологічного процесу, які можна визначити лише експериментально.

У [8] запропоновано використовувати ентропію заготовок як критерій завершення процесу випалювання. Його практичне значення полягає насамперед у можливості визначення потрібної кінцевої температури заготовок, по досягненню якої і, можливо, витримуванні при ній протягом деякого часу, випалювання буде завершеним.

У [8] також показано, що перспективним для використання у системі керування процесом випалювання вуглецевих виробів є регулятор із модельно-прогнозуючим керуванням – МП-регулятор (англ. MPC – model predictive controller), який за більшістю показників якості керування перевершує ПД- і селективний ПД-регулятори. В дослідженні [9] визначено, що надмірне збільшення горизонту прогнозування регулятора призводить до збільшення тривалості перехідного процесу, однак період квантування регулятора не вказано, тому неможливо оцінити фактичну величину горизонту прогнозування. Залишається також недослідженою якість керування за наявності обмежень на величину керуючого впливу та на швидкість нагрівання, а також за наявності похибок у математичній моделі, яка використовується у розрахунках.

Метою статті є на основі МП-регулятора математично сформулювати задачу керування процесом випалювання вуглецевих виробів у камері «під вогнем» з виконанням наступних вимог: 1) тривалість процесу випалювання повинна забезпечувати досягнення потрібних кондицій усіма заготовками, завантаженими у камеру; 2) у процесі випалювання перепад температур у заготовках не повинен перевищувати визначені межі.

Треба зазначити, що сформульовані вимоги до керування процесом випалювання протирічають одна одній. З одного боку, треба прагнути мінімізувати тривалість процесу для забезпечення максимальної інтегральної продуктивності виробництва, для чого потрібно проводити процес з максимальною швидкістю нагрівання заготовок. З іншого боку, максимальна швидкість нагрівання може призвести до перевищення допустимих перепадів температур у заготовках, а значить, до браку продукції.

У роботі [8] як критерій завершення процесу випалювання пропонується використати ентропію заготовок, яка безпосередньо пов'язана з їх температурою. Зрозуміло, що для забезпечення досягнення потрібних кондицій усіма заготовками, завантаженими у камеру, потрібно орієнтуватися на заготовку з мінімальною температурою (точка 3).

Як свідчать результати проведених досліджень [1, 3–6], найбільший перепад температур спостерігається у заготовці з найвищими температурами (різниця температур у точках 1(вища температура) і 2). Остання величина неявно обмежує допустиму швидкість нагрівання заготовок.

Крім того, існують обмеження, накладені на керування, які можуть мати як конструкційну, так і технологічну природу. Наприклад, якщо є обмеження на витрату повітря, що подається на спалювання, через обмежену допустиму швидкість охолодження випалених заготовок, тоді й витрата пального є обмеженою.

Умовну структуру об'єкта керування наведено на рис.1. Через велику інерційність останнього можна нехтувати інерційністю засобів вимірювальної техніки (термопар), тобто прийняти припущення про миттєве вимірювання температури в обраних точках печі. Похибкою вимірювання також нехтуємо.

Об'єкт має єдине керування – витрату газу. Вхідні сигнали збурень відсутні. Залежністю від витрати палива інших впливів, як: витрати й температури повітря, яке надходить в камеру «під вогнем», вмісту кисню в повітрі, розрідження в камері спалювання – нехтуємо.

Вихідних величин три: відхилення температур кожної з трьох досліджуваних точок у печі від їхнього початкового значення. Об'єкт умовно представлений у вигляді 3-х незалежних каналів впливу у відповідності до 3-х названих вище точок, які мають спільний вхідний сигнал і незалежні вихідні сигнали.

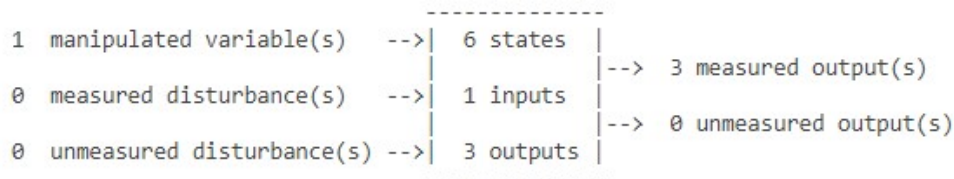


Рис. 1 – Структура об'єкта керування

Критерій оптимальності МП-регулятора має наступний вигляд [11]:

$$J(z_k) = J_y(z_k) + J_u(z_k) + J_{\Delta u}(z_k) + J_\varepsilon(z_k)$$

де z_k – прийняте для k -го горизонту прогнозування керування; J_y – доданок, який відображає якість виконання завдання керування, J_u відображає врахування величини керування, $J_{\Delta u}$ відображає врахування швидкості зміни керування, J_ε відіграє роль штрафної функції, яка враховує величину порушення обмежень, накладених на виходи об'єкту. Вектор z_k має вигляд

$$z_k^T = (u((k-1) \cdot p + 1) \quad \dots \quad u((k-1) \cdot p + (p-1)) \quad \varepsilon(k))$$

де $u(i)$ – вектор керування на i -му періоді квантування, k – номер горизонту прогнозування, p – величина горизонту прогнозування.

Швидкість зміни керування величина $(u_k - u_{k-1})$ не має значного впливу на якість продукції [2,8]. Мала інерційність виконавчих механізмів порівняно з інерційністю температури в печі дозволяє розглядати керування як таке, що змінюється миттєво. Тому у даній роботі прийнято $J_{\Delta u} \equiv 0$.

Наведемо доданки у критерії оптимальності в розгорнутому вигляді [11]:

$$J_y(z_k) = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^p \left(\frac{w_j^y}{s_j^y} \cdot (r_j^y - \Delta\theta_{3j}((k-1) \cdot p + i)) \right)^2 \quad (1)$$

$$J_u(z_k) = \sum_{i=1}^p \left(\frac{w^u}{s^u} \cdot (r^u - u((k-1) \cdot p + i)) \right)^2 \quad (2)$$

$$J_\varepsilon(z_k) = \rho_\varepsilon \varepsilon(k)^2 \quad (3)$$

де r_j^y – завдання для температури j -ої точки, r^y – витрата палива в статичному режимі, ε – допоміжна змінна для врахування міри порушення обмежень, s_j^y , s^u – масштабні коефіцієнти, w_j^y , w^u , ρ_ε – незмінні вагові коефіцієнти.

Обмеження мають наступний вигляд:

$$u_{min} \leq u(i) \leq u_{max} \quad (4)$$

$$\theta_1(i) - \theta_2(i) \leq (\theta_1(i) - \theta_2(i))_{max} + \varepsilon V_{max} \quad (5)$$

де V_{max} – ваговий коефіцієнт, який визначає міру жорсткості обмежень на різницю температур у точках 1 і 2. Чим менший цей коефіцієнт, тим більшою повинна стати змінна ε в разі порушення обмежень, і тим більшим буде вага обмеження при визначенні оптимального керування.

Пом'якшення обмежень на вихідні величини необхідне через неточність моделі, що може призвести до неможливості задовольнити обмеження [10, 11]. Порушення жорстких обмежень (обмеження (4) на величину керування) призводить до аварійної зупинки програми керування, що є неприпустимим. Нижню межу відкинута з фізичних міркувань, позаяк температура точки 2 не може перевищити температуру точки 1.

З урахуванням нерівності (5), вираз (3) запишемо як

$$J_\varepsilon(z_k) = \frac{\rho_\varepsilon}{V_{max}} \cdot \left((\theta_1(i) - \theta_2(i))_{max} - (\theta_1(i) - \theta_2(i)) \right)^2$$

М'які обмеження на керування $u(i)$ було б доцільно накладати в разі врахування динаміки температури в інших камерах печі. В даному випадку ці обмеження мають бути жорсткими.

Масштабні коефіцієнти в критерії керування визначено вибраними числовими значеннями обмежень і приблизним діапазоном зміни температур, визначеним за допомогою симуляцій: $s_1^y = 800$ °C, $s_2^y = 800$ °C, $s_3^y = 630$ °C, $s^u = 40$ м³. Вагові коефіцієнти для вихідних величин визначені з умови керування за температурою найхолоднішої заготовки: $w_1^y = 0$, $w_2^y = 0$, $w_3^y = 1$. Для ρ_ε збережено його значення за замовчуванням $\rho_\varepsilon = 10^6$. Коефіцієнт w^u взято за параметр налаштування регулятора.

Завдання r_3^y потрібно визначати, виходячи з критеріїв якості продукції, що є окремою прикладною задачею. Тут значення обрано довільно. Внаслідок нульових вагових коефіцієнтів для температур точок 1 і 2 в критерії оптимальності завдання для них є довільним числом, наприклад, 0. Завдання для керування r^u визначено зі статичної моделі температури точки 3:

$$r^u = \frac{\Delta\theta_3(T_f)}{K_3}$$

де T_f – тривалість перехідного процесу, год.

Обмеження на керування u_{min} , u_{max} залежать від конструктивних особливостей устаткування, а також від обмежень на швидкість нагрівання заготовок на різних етапах випалювання.

Обмеження на перепад температури в заготовках $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$ визначають із результатів експериментальних досліджень і симуляцій. Поріг різниці температур прийнято за параметром для дослідження якості керування за різних його значень. Ваговому коефіцієнту V^{max} надано значення 0,05, згідно з рекомендацією [11].

Числові значення параметрів, вибрані для обчислень, наведено в табл. 1. Зауважимо, що завдання для температури стосується відхилення температури від її початкового значення для даної точки.

Таблиця 1 – Числові параметри задачі керування

Параметр	r_1^y , °C	r_2^y , °C	r_3^y , °C	r^u , м ³ /Год	u_{min} , м ³ /Год	u_{max} , м ³ /Год	V_{max}
Значення	0	0	630	31,79	0	40	0,05

Підставляючи всі числа в критерії (1) – (3) й обмеження (4) – (5), отримаємо загальну задачу керування для системи керування з МП-регулятором:

$$\begin{cases} J(z_k) = \sum_{i=1}^p \left(\left[\frac{630 - \Delta\theta_{3j}(k+i)}{630} \right]^2 + \left[\frac{w^u \cdot (31,79 - u(k+i))}{40} \right]^2 + 10^6 \cdot \varepsilon(k+i)^2 \right) \\ 0 \leq u(i) \leq 40 \\ \theta_1(i) - \theta_2(i) \leq (\theta_1(i) - \theta_2(i))_{max} + 0,05 \cdot \varepsilon \end{cases}$$

з довільно фіксованими величинами w^u (параметр налаштування) і $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$ (умова конкретної задачі керування).

Висновки. Математично сформульована задача керування процесом випалювання вуглецевих виробів, яка враховує, з одного боку, потрібну тривалість процесу, а, з другого боку, запобігає перегріванню заготовок, що може призвести до перевищення допустимого перепаду температур у заготовках, а, значить, до браку продукції.

Визначені основні температурні точки, які мають бути контрольовані для розв'язання задачі керування. До них віднесені дві точки у заготовці з найвищою температурою (для контролю за перепадом температур) та одна точка у заготовці з найнижчою температурою (для визначення потрібної тривалості випалювання).

Критерій керування включає три доданки, які відповідають за наступні складові: якість відтворення завдання для найхолоднішої заготовки (гарантія закінчення випалювання для всіх заготовок); витрата палива (економічність виробництва); величина порушення м'яких обмежень (запобігання виготовленню бракованої

продукції). Було визначено величину завдання керування, обмеження, значення масштабних і вагових коефіцієнтів у критерії, визначено змінні параметри для дослідження роботи системи керування.

Проаналізовані складові критерію керування і дане обґрунтування нехтування деяких його складових. Визначений параметр налаштування системи керування.

Перспективи подальших досліджень. Для синтезу системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів з використанням МП-регулятора потрібно розробити математичну модель, що буде використана у структурі системи керування. Ефективність синтезованої системи має бути досліджена у різних режимах роботи.

Список використаної літератури

1. Пулінець І. В. Підвищення ефективності роботи печей випалу вуглеграфітових виробів : дис. ... канд. техн. наук. : 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології / І. В. Пулінець. – К., 2013. – 204 с.
2. Лелека С.В. Наукові засади розробки ресурсоенергоєфективних процесів та обладнання вуглеграфітового електродного виробництва : дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.17.08 / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Київ, 2021. 371 с.
3. Жученко О. А. Дослідження процесу охолодження у багатокамерних печах випалювання вуглецевих виробів / Жученко О. А., Коротинський А. П. // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки том 29 (68) часть 1 – 2018. (включено до наукометричної бази даних Index Copernicus).
4. Жученко О. А. Дослідження впливу надлишку повітря на процес нагрівання багатокамерної печі випалювання димовими газами / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2018. – № 1. – С. 71–80. (досліджено вплив надлишку витрати повітря на температурні поля процесу випалювання на стадії нагрівання димовими газами).
5. Жученко О. А. Дослідження впливу розрідження на процес нагріву багатокамерної печі випалювання димовими газами / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Наукоємні технології. – 2018. – № 2. – С. 255–264.
6. Жученко О. А. Дослідження впливу розрідження на температурний режим процесу випалювання вуглецевих виробів на етапі камера «під вогнем» / О.А. Жученко, А.П. Коротинський // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – 2018. – №47. – С. 44-49.
7. Жученко О. А. Метод спрощення математичних моделей об'єктів керування із розподіленими параметрами / Міжнародний науково-виробничий журнал «Автоматизація технологічних і бізнеспроцесів» Vol. 7, issue 1/2015. С. 15–25.
8. Коротинський, А. П. Автоматизація процесу керування багатокамерними печами випалювання вуглеграфітових виробів : дис. ... д-ра філософії : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Коротинський Антон Петрович. – Київ, 2020. – 190 с.
9. Zhuchenko O. Investigation influence of predict gorizont of mpc-regulator for control of the baking process/ O. Zhuchenko, A. Korotynskiy // Slovak international scientific journal VOL.2, №37, 2020
10. Rawlings J, Mayne D, Diehl M. 2017. Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. Santa Barbara, CA: Nob Hill
11. Model Predictive Control Toolbox Documentation: веб-сайт. URL: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2021a/mpc/index.html> (дата звернення: 19.08.2023).

Anatolii Zhuchenko, Redrikh Putiatin

THE CONTROL PROBLEM OF THE BURNING PROCESS CARBONACEOUS PRODUCTS

Feasibility of model predictive control is shown based on the analysis of the existing control systems for carbonaceous products burning of the carbon graphite production. The considered restrictions that should be imposed on the control to ensure, on the one hand, the required duration of the burning process to achieve the required conditions by all the blanks and, on the other hand, to prevent overheating of the blanks, which leads to an excess of the permissible temperature difference in the blanks and, therefore, to product defects. The mathematical formulation of the control problem is shown, the purpose of which is to increase the energy efficiency of the burning process, considering structural and technological limitations.

Keywords: *optimal control, MPC, identification, burning, carbonaceous products*

References

1. Pulinec J. V. Pidvyshhennja efektyvnosti roboty pechej vypalu vuhleghrafitovykh vyrobiv : dys. ... kand. tekhn. nauk. : 05.17.08 – procesy ta obladnannja khimichnoji tekhnologhiji / I. V. Pulinec. – K., 2013. – 204 s.
2. Leleka S.V. Naukovi zasady rozrobky resursoenerhoefektyvnykh protsesiv ta obladnannia vuhleghrafitovoho elektrodnoho vyrobnytstva : dys. na zdobuttia nauk. stupenia d-ra tekhn. nauk : 05.17.08 / NTUU «KPI im Ihoria Sikorskoho». Kyiv, 2021. 371 s.
3. Zhuchenko O. A. Doslidzhennia protsesu okholodzhennia u bahatokamernykh pechakh vypaliuvannia vuhletsevykh vyrobiv / Zhuchenko O. A., Korotynskyi A. P. // Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seria: tekhnichni nauky tom 29 (68) chast 1 – 2018. (vključeno do naukometrychnoi bazy danykh Index Copernicus).
4. Zhuchenko O. A. Doslidzhennia vplyvu nadlyshku povitria na protses nahrivannia bahatokamernoi pechi vypaliuvannia dymovymy hazamy / O. A. Zhuchenko, A. P. Korotynskyi // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. – 2018. – # 1. – S. 71–80. (doslidzheno vplyv nadlyshku vytraty povitria na temperaturni polia protsesu vypaliuvannia na stadii nahrivannia dymovymy hazamy).
5. Zhuchenko O. A. Doslidzhennia vplyvu rozridzhennia na protses nahrivu bahatokamernoi pechi vypaliuvannia dymovymy hazamy / O. A. Zhuchenko, A. P. Korotynskyi // Naukoiemni tekhnolohii. – 2018. – # 2. – S. 255–264.
6. Zhuchenko O. A. Doslidzhennia vplyvu rozridzhennia na temperaturnyi rezhym protsesu vypaliuvannia vuhletsevykh vyrobiv na etapi kamera «pid vohnem» / O.A. Zhuchenko, A.P. Korotynskyi // Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu. Zbirnyk naukovykh prats. – 2018. – #47. – S. 44–49.
7. Zhuchenko O. A. Metod sproshchennia matematychnykh modelei ob'ektiv keruvannia iz rozpodilenykh parametramy / Mizhnarodnyi naukovo-vyrobnychi zhurnal «Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznesprotsesiv» Vol. 7, issue 1/2015. S. 15-25.
8. Korotynskyi, A. P. Avtomatyzatsiia protsesu keruvannia bahatokamernymy pechamy vypaliuvannia vuhleghrafitovykh vyrobiv : dys. ... d-ra filosofii : 151 Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii / Korotynskyi Anton Petrovych. – Kyiv, 2020. – 190 s.
9. Zhuchenko O. Investigation influence of predict gorizont of mpc-regulator for control of the baking process/ O. Zhuchenko, A. Korotynskyi // Slovak international scientific journal Vol. 2, №37, 2020.
10. Rawlings J, Mayne D, Diehl M. 2017. Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design. Santa Barbara, CA: Nob Hill
11. Model Predictive Control Toolbox Documentation: veb-sait. URL <https://www.mathworks.com/help/releases/R2021a/mpc/index.html> (data zvernennia: 19.08.2023).