

Жученко Л.К.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

Вуглеграфітові матеріали відіграють важливу роль у різних галузях промисловості України: хімічній та електротехнічній, чорній та кольоровій металургії, машинобудуванні та інших. Якість вуглеграфітових виробів безпосередньо залежить від процесу їх виготовлення. Одним з визначальних етапів виробництва є процес випалювання вуглеграфітових виробів, який характеризується значною енерго- та ресурсозатратністю. Ефективним методом розв'язання задачі енергозбереження та забезпеченні потрібної якості кінцевої продукції у процесі випалювання є створення сучасної системи керування даним процесом.

У статті показано, що для забезпечення потрібної якості вуглецевих виробів у процесі випалювання необхідно розв'язати дві задачі: запобігти перевищенню допустимого перепаду температур у заготовці та забезпечити потрібну тривалість процесу випалювання. Наведені результати дослідження зв'язку між даними показниками свідчать, що величина допустимого максимального перепаду температур суттєво впливає на тривалість процесу випалювання, а значить, і на його загальну продуктивність.

У статті запропонована система керування процесом випалювання вуглецевих виробів реального часу, яка розв'язує поставлені задачі, а також дозволяє враховувати поточні збурення, діючи в процесі випалювання та забезпечує оптимальне керування технологічним процесом після його зупинки, викликаній аварійними ситуаціями (наприклад, відключенням електроживлення).

Визначальним технологічним режимом процесу випалювання є температурний режим його роботи. Для оптимального керування температурним режимом даного процесу використовується лінійно-квадратичний регулятор. У критерій оптимальності системи керування включені три складові, які забезпечують: дотримання заданого температурного режиму у нижній точці заготовки з найменшою температурою, яка знаходиться у холодній зоні печі випалювання, запобігання перевищенню максимально допустимого перепаду температур у заготовці з найбільшою температурою у гарячій зоні печі та економію витрат палива.

Ключові слова: випалювання, температурний режим, перепад температур, тривалість процесу, система керування, лінійно-квадратичний регулятор.

Постановка проблеми. Починаючи з 50-тих років минулого століття, схема технологічного процесу випалювання майже не змінилась та являє собою нагрівання заготовок від початкової температури до кінцевої температури випалювання за заданим графіком зі швидкістю, яка визначається набором фізико-хімічних властивостей виробів, які необхідно отримати. При цьому весь перебіг процесу визначається оператором-технологом наперед на основі власного досвіду та статистичних даних, накопичених на попередніх кампаніях випалювання, і залишається незмінним на протязі всієї поточної кампанії. Після розміщення горілки на черговій камері (після чого камера стає «камерою під вогнем») для забезпечення максимальної продуктивності виробництва процес випалювання триває певний час при максимальній витраті палива. При цьому, як свідчить практика, об'єктивно існуючі помилки у технологічній реалізації перебігу

процесу та його тривалості призводять, з одного боку, до перевитрат енергоносіїв, а з іншого боку – до значної кількості браку кінцевої продукції.

Відомі на сьогоднішній день системи керування процесом випалювання розглядають питання якості продукції та енергозбереження окремо одне від одного, без комплексного підходу до їх розв'язання у рамках однієї оптимальної системи керування.

У праці [1] запропонована система програмного керування процесом випалювання вуглецевих виробів. На жаль, така система, як і будь-яка інша система програмного керування, має ряд недоліків, до яких у даному випадку можна віднести наступні:

– у разі відключення електроживлення, що сьогодні не є чимось незвичним, подальше керування процесом випалювання стає проблемним, орієнтованим знову ж таки на досвід оператора-технолога;

– при такому способі керування не контролюються заготовки, які знаходяться у «гарячій зоні» з найвищими температурами, де перепад температур по висоті заготовки може перевищувати допустимі межі, що призведе до механічних ушкоджень (браку продукції);

– неможливо врахувати збурення, які діють в процесі випалювання: зміну температури повітря, можливу зміну співвідношення паливо/повітря, зміну величини вакууму тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Але, незважаючи на спроби автоматизувати роботу багатокамерних кільцевих печей випалювання [2], до останнього часу так і не була реалізована ефективна система керування даного процесу [3–5].

Проаналізуємо декілька найбільш цікавих розробок останніх років, які, якщо не безпосередньо, то хоча б опосередковано, можуть стосуватися процесу випалювання..

У роботі [6] представлена система керування температурою сталевих смуги. Система побудована за ієрархічним принципом. Верхній рівень називається «оптимальним контролем попереднього перегляду», який виконує попередній контроль. Він переглядає наближення зміни налаштування, якими є зміна розміру смуги або еталонної температури, і оптимізує швидкість лінії і траєкторію температури смуги. Наступний, нижній рівень називається «контроль відстеження температури», який реалізує замкнене керування, використовуючи вищевказану траєкторію в якості контрольної мети.

Що стосується переваг роботи запропонованого підходу в порівнянні з традиційним ПІД-контролем, то найбільшою перевагою є збільшення продуктивності виробництва від 3 до 5 %, оскільки контроль є достатньо точним, щоб позбавити операторів від частого втручання та уповільнення швидкості лінії через небезпеку недогрівання смуги.

Застосування даного підходу при випалюванні вуглецевих заготовок в багатокамерних печах у випадку, коли в камерах, що знаходяться «під вогнем», і камерах на підігріванні димовими газами розміщені різні за розміром заготовки може призвести до визначення елементом верхнього рівня даної ієрархії траєкторії температури для камери, що знаходяться «під вогнем», недопустимої для відтворення траєкторії температури камери, що знаходяться на підігріванні димовими газами. Оскільки температура димових газів прямо залежить від температури факелу,

то в даному випадку можлива ситуація, при якій витрата палива на камері «під вогнем» достатня для забезпечення теплового режиму, а для камер з іншими заготовками, що знаходяться на етапі підігріванні димовими газами, температурний режим перевищує допустимі значення. Відтак може скластися ситуація, в якій деякі заготовки не будуть відповідати поставленим умовам якості.

Традиційна система керування на базі ПІД-регулятора може задовольнити вимоги до системи керування в більшості випадків, але не в процесі керування об'єктом з нелінійними, тимчасовими змінами, характерними для процесу випалювання вуглецевих виробів. Для вирішення даної проблеми в роботі [7] представлена система керування температурою на основі ПІД-каскаду, що заснована на Сміт-оцінці попередньої компенсації. Використання каскадного керування при розробці системи керування багатокамерною піччю випалювання має ряд переваг, проте через інерційність об'єкта навіть очікування зміни температури печі на деяких ключових етапах займає досить значний час. Відтак некоректний керуючий вплив призведе до нераціонального використання тих чи інших ресурсів.

У дослідженнях [3; 8; 9] система керування багатокамерною піччю випалювання на базі штучних нейронних мереж. Дана система, на думку авторів, у порівнянні з системою керування з класичним ПІД-регулятором забезпечує економію витрат палива та підвищення якості готової продукції за рахунок зменшення перепадів та приростів температури протягом всього процесу випалювання.

Постановка завдання. Наведені вище обставини обумовлюють необхідність створення системи керування процесом випалювання, яка б задовольняла наступним вимогам:

- дана система має бути системою реального часу;
- система повинна комплексно розв'язувати питання енергозбереження та забезпечення потрібної якості вуглецевих виробів;
- з метою запобігання браку готової продукції система має узгоджувати допустимі перепади температур у заготовках з тривалістю процесу випалювання;
- у разі виникнення аварійних ситуацій після їх усунення процес випалювання має продовжуватись з урахуванням вище названих умов.

Таким чином, метою даної статті є синтез та дослідження системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів, яка б відповідала наведеним вище вимогам.

Виклад основного матеріалу. Будь-яка система реального часу будується на вимірюванні технологічних параметрів, які є для неї визначальними. До визначальних технологічних параметрів процесу випалювання вуглецевих виробів відносяться параметри, що, з одного боку, обумовлюють тривалість процесу, а, з іншого боку, забезпечують відсутність бракованої продукції. Тому перш за все треба з'ясувати які саме технологічні параметри є визначальними у даному випадку і яким чином організувати їх вимірювання.

Численні дослідження [1–5; 8] свідчать, що всі техніко – економічні показники процесу випалювання вуглецевих виробів пов'язані з температурним режимом його реалізації. У праці [8] показано, що весь простір камери випалювання може бути умовно розбитий на три теплові зони: гарячу, холодну та підсклепінчасту з відповідними найвищими, найнижчими та проміжними температурами. Причому, що дуже важливо, міграція цих зон не спостерігається при зміні типорозмірів заготовок та їх комбінацій.

Очевидно, що процес випалювання має тривати до повного його завершення у заготовці з найнижчою температурою. Тоді доцільно як температуру, яка фактично визначає тривалість процесу випалювання, розглядати температуру нижньої точки найхолоднішої заготовки у холодній зоні камери.

Брак продукції у процесі випалювання, як правило, обумовлений перевищенням допустимого перепаду температур у заготовці, що призводить до виникнення тріщин [1; 4; 5; 8]. Як показали проведені дослідження [4; 5; 8], найбільш «небезпечними» у цьому розумінні є заготовки у гарячій зоні печі. Цей факт обумовлює доцільність вимірювання температур верхньої та нижньої точок заготовки з найвищою температурою у гарячій зоні.

Зрозуміло, що виміряти температуру всередині заготовки неможливо, але, як свідчать результати проведених досліджень [3; 8; 10], температура пересипки біля заготовки практично не відрізняється від температури самої заготовки, а температуру пересипки виміряти можна. Тому для використання у системі керування процесом випалювання пропонуються температури пересипки у відповідних точках. Для реалізації такої системи потрібно розмістити термопару у пересипці поблизу нижньої частини заготовки у зоні з мінімальною температурою, та дві термопари у пересипці біля верхньої та нижньої частини заготовки, яка знаходиться у зоні з максимальною температурою. Останні термопари потрібні

для вимірювання різниці температур у заготовці з максимальним їх перепадом.

Термопара у зоні з мінімальною температурою дає можливість, крім того, враховувати усі можливі названі вище збурення.

Систему керування процесом випалювання вуглецевих виробів з урахуванням вимог до неї, сформульованих вище, доцільно будувати на основі лінійно-квадратичного регулятора.

Як критерій оптимальності будемо використовувати наступний вираз:

$$J = \sum_{k=0}^N [q(T(k) - T_{зад}(k))^2 + ru^2(k) + \frac{f}{(\Delta T(k) - \Delta T_{дон}(k))^2}]. \quad (1)$$

де q , r та f – параметри налаштування; $T_{зад}(k)$ – задане значення температури у точці 3; $\Delta T(k)$, $\Delta T_{дон}(k)$ – перепад температур поточний та допустимий відповідно.

Для розв'язання задачі (1) потрібно використовувати пошукові методи оптимізації [1].

У разі аварійної ситуації (відключення енергоживлення) процес керування відновлюється, починаючи з того стану, в якому він опинився на момент ліквідації аварійної ситуації (відновлення енергоживлення).

Метою дослідження, наведеного нижче, системи керування реального часу було з'ясувати наскільки обмеження на максимальний перепад температур у найбільш «небезпечній» заготовці (у заготовці, яка знаходиться у «гарячій зоні» з найвищими температурами) впливає на тривалість процесу випалювання. При цьому налаштування ЛК-регулятора залишалися незмінними.

Результати проведеного дослідження представлені на рис. 1, де $T_k = N\Delta\tau$ ($\Delta\tau$ – час дискретизації) – тривалість процесу випалювання.

Точки 1 і 2 – відповідно верхня і нижня точки заготовки, яка розташована у «гарячій зоні» з найвищими температурами. Саме різниця температур у цих точках формує максимальний перепад, який є предметом даного дослідження. Точка 3 – нижня точка заготовки у «холодній зоні», де температура найменша. Температура у цій точці визначає тривалість процесу випалювання. Процес випалювання вважався завершеним, коли температура у точці 3 досягала 1300 °С.

Як видно з результатів дослідження, тривалість процесу випалювання фактично визначається допустимим перепадом температур у заготовці. У разі незначних допустимих перепадів температур навіть значна тривалість процесу не забезпечує потрібну якість продукції (рис. 1а, 1б, 1в). Більше того, перевищення допустимих значень

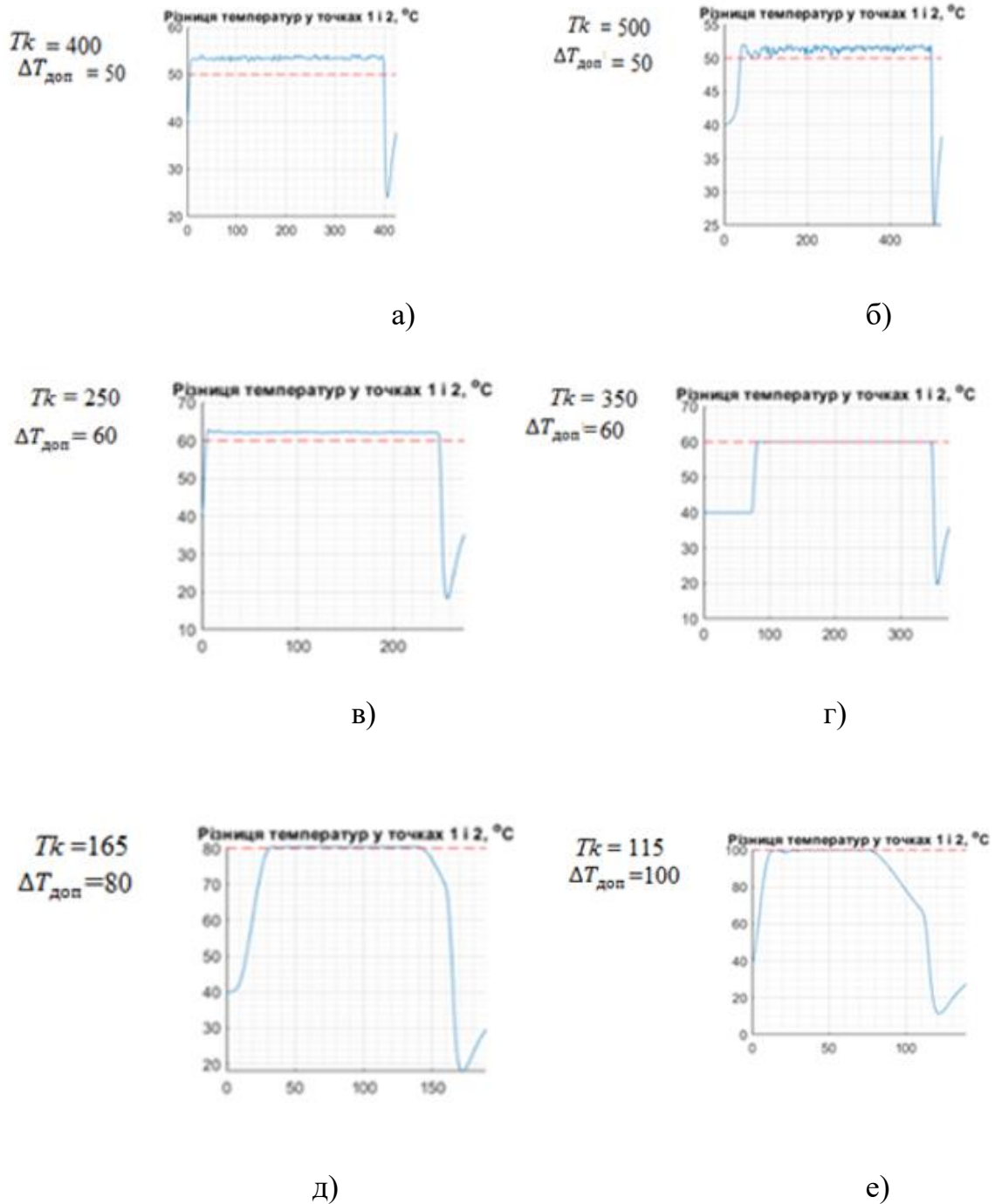


Рис. 1. Результати проведеного дослідження

перепадів спостерігається протягом всієї кампанії випалювання, що гарантовано призведе до браку продукції.

При збільшенні допустимих перепадів температур (рис. 1г, 1д, 1е) суттєво скорочується потрібна тривалість процесу випалювання. При досить значних допустимих перепадах (рис. 1е) максимальне їх значення спостерігається на протязі тільки частини кампанії випалювання.

Зміна параметрів налаштування регулятора може скоригувати картину процесу випалювання, але загальна тенденція залишиться без змін.

Висновки. Запропонована система керування процесом випалювання вуглецевих виробів реального часу, яка дозволяє враховувати поточні збурення, діючи в процесі випалювання, а також продовжувати оптимальне керування технологічним процесом після його зупинки, викликаної аварій-

ними ситуаціями (наприклад, відключенням енергоживлення).

Проведене дослідження засвідчило, що заданий допустимий перепад температур у найбільш «небезпечній» заготовці фактично визначає доцільну тривалість процесу випалювання, а, значить, в решті решт, впливає на загальну продуктивність виробництва.

Як показали результати проведеного дослідження, навіть незначне збільшення допустимого

перепаду температур у заготовці призводить до суттєвого збільшення тривалості процесу випалювання.

Представлена система керування процесом випалювання вуглецевих виробів побудована на основі лінійно-квадратичного регулятора. Видається доцільним розглянути питання про можливість застосування модельно-прогнозуючого керування (Model Predictive Control) у процесі випалювання вуглецевих виробів, що і має бути предметом подальших досліджень.

Список літератури:

1. Коротинський А. П. Дослідження впливу витрати палива на температурні поля печі випалювання вуглецевих виробів / О. А. Жученко, А. П. Коротинський. *Збірник наукових праць національного університету кораблебудування імені Адмірала Макарова*. 2019. № 4 (478). С. 3–10.
2. Жученко Л. К. Автоматизація процесів керування термічною обробкою вуглецевих матеріалів : дис. докт. філософії : 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ, 2024. 164 с.
3. Жученко О. А. Постановка задачі керування процесом випалювання у виробництві вуглецевих виробів / О. А. Жученко, А. П. Коротинський. *Гірничий вісник. Науково-технічний збірник. ДВНЗ «Криворізький національний університет»*. 2017. № 102. С. 174–179.
4. Коротинський А. П. Аналіз процесу випалювання вуглеграфітових виробів / А.П. Коротинський, О.А. Жученко. *Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта)* : Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. (Київ, 14–18 листопада 2016 р). Київ : НУБіП, 2016 р. С. 64–65.
5. Жученко О. А. Задачі керування процесом випалювання / О. А. Жученко, А. П. Коротинський. *Автоматика – 2017* : матеріали XIV Міжнародної конференції з автоматичного управління. (Київ, 13–15 вересня 2017 р.). Київ. 2017. С. 68–69.
6. Yoshitani N., Hasegawa A. Model-Based Control of Strip Temperature for the Heating Furnace in Continuous Annealing. *IEEE Transactions On Control Systems Technology*. 1998. Vol. 6. № 2.
7. Ke X., Luo Z., Zhu Y., Liu Y. The Temperature Control System of Continuous Diffusion Furnace. *In Proceedings of the 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2016)*. Vol. 1. P. 227–233. DOI: 10.5220/0005996402270233
8. Коротинський А.П. Автоматизація процесу керування багатокамерними печами випалювання вуглеграфітових виробів : дис. докт. філософії : 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ, 2020. 190 с.
9. A system of automated control for the baking process that minimizes the probability of defects / А. Korotynskiy, О. Zhuchenko. *Східно-Європейський журнал передових технологій* : Міжнародний наукометричний журнал. 2020. № 1/2 (103). С. 58–67.
10. Жученко Л.К. Система програмного керування процесом випалювання вуглецевих виробів / Л. К. Жученко. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2023. Т. 6. № 1. С. 46–53. DOI: <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2023-6-1-5>

Zhuchenko L.K. CONTROL SYSTEM OF THE CARBON PRODUCTS BURNING PROCESS

Carbon graphite materials play an important role in various branches of Ukrainian industry: chemical and electrical engineering, ferrous and non-ferrous metallurgy, mechanical engineering, and others. The quality of carbon graphite products directly depends on the process of their production. One of the defining stages of production is the process of burning carbon graphite products, which is characterized by significant energy and resource consumption. An effective method of solving the problem of energy saving and ensuring the required quality of final products in the burning process is the creation of a modern system for control this process.

The article shows that in order to ensure the required quality of carbon products in the burning process, it is necessary to solve two tasks: to prevent exceeding the permissible temperature difference in the workpiece and to ensure the required duration of the burning process. The presented results of the study of the relationship between these indicators show that the value of the maximum permissible temperature difference significantly affects the duration of the burning process, and therefore, its overall productivity.

The article proposes a real-time control system for the burning process of carbon products, which solves the set problems, and also allows taking into account current disturbances acting in the burning process and

provides optimal control of the technological process after its stoppage caused by emergency situations (for example, power failure).

The determining technological regime of the burning process is the temperature regime of its operation. A linear-quadratic controller is used to optimally control the temperature regime of this process. The control system optimality criterion includes three components that ensure: compliance with the specified temperature regime at the lowest point of the workpiece with the lowest temperature, which is in the cold zone of the burning furnace, prevention of exceeding the maximum permissible temperature difference in the workpiece with the highest temperature in the hot zone of the furnace, and cost savings fuel.

Key words: *burning, temperature regime, temperature difference, process duration, control system, linear-quadratic regulator.*