

Жученко Л.К.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

У роботі сформульована задача оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів. Одним із основних технологічних процесів у виробництві вуглецевих виробів є процес випалювання. Даний процес характеризується з одного боку, енерговитратами, а з іншого боку – значною кількістю бракованої продукції, що не відповідає необхідним вимогам.

У зв'язку з даними обставинами виникає актуальна науково – технічна задача підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів, яка полягає у зменшенні енергоспоживання та забезпеченні потрібної якості кінцевої продукції. Одним з ефективних шляхів розв'язання цієї задачі є створення сучасної системи оптимального керування процесом випалювання. На відміну від відомих систем керування даним процесом запропоновані підходи дозволять забезпечити режим найбільш ефективного використання енергоносіїв при зменшенні кількості бракованої продукції.

Запропоновані 2 підходи до побудови системи оптимального керування – програмне керування та керування у реальному часі.

Показані недоліки системи програмного керування, указані шляхи їх ліквідації у системі реального часу. Обґрунтована доцільність використання модельно – прогнозуючого керування (МРС – підхід) для системи оптимального керування процесом випалювання.

Ключові слова: *вуглецеві вироби, система оптимального керування, програмне керування, керування у реальному часі, модельно – прогнозуюче керування.*

Постановка проблеми. Аналіз сьогоденної практичної реалізації процесу випалювання вуглецевих виробів свідчить про те, що даний процес є фактично некерованим. Після розміщення горілки на черговій камері (після чого камера стає «камерою під вогнем») процес випалювання триває певний час при максимальній витраті палива. Тривалість даного процесу задається оператором – технологом на основі власного досвіду та статистичних даних, накопичених на попередніх кампаніях випалювання. Такий підхід забезпечує максимальну продуктивність печі випалювання щодо виробів, що обробляються.

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.

Існуючі системи керування процесом випалювання, короткий аналіз яких наведений вище, розглядають питання якості продукції та енергозбереження окремо одне від одного, без комплексного підходу до їх розв'язання у рамках оптимальної системи керування.

Створенню будь – якої оптимальної системи керування передують етап формулювання задачі оптимального керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На жаль, на сьогоднішній день питанню створення та впровадження системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів приділено недостатньо уваги. Відомі роботи присвячені в основному або питанням контролю за температурним режимом печі випалювання, або питанням організації самого процесу випалювання.

Так, у дослідженні [1] описана робота двох дифузійних пальників, що встановлені в склепінні камери, при тиску газу 3000 Па, що дозволяло вести процес випалювання за заданим графіком з точністю $-50 \dots + 30$ °С. Контроль процесу зводився до вимірювання температури під склепінням камери і запису показів на вторинному приладі (самописці). Очевидно, що, крім низької точності дотримання графіка випалювання заготовок, такий спосіб керування призводив до невинновданно високої перевитрати палива і значного браку через досить великий перепад температури по висоті камери.

У зв'язку з практичною неможливістю регулювання співвідношення повітря/газ через особливості конструкції печі, а саме підсосу повітря на контактні склепіння з камерою печі, у роботах [2, 3] наведено теоретичне обґрунтування

доцільності використання системи імпульсного спалювання палива для багатокамерних печей випалювання, що призводить, на думку авторів, до зменшення перевитрати палива. А у роботах [4, 5] дається обґрунтування доцільності створення системи керування процесом випалювання вуглеграфітових заготовок з використанням системи імпульсного спалювання палива.

З досліджень останніх років слід виділити роботи [6-8]. У них обґрунтовано доцільність синтезу системи керування на базі штучних нейронних мереж для вирішення задачі визначення ймовірності дефектів у заготовках. Вирішена задача обмеженості необхідних для навчання нейронної мережі даних шляхом застосування особливої структури – автоенкодера. У порівнянні з системою керування з класичним ПІД-регулятором розроблена система забезпечує меншу витрату палива для досягнення продукції необхідної якості. Запропонований регулятор забезпечує менші перепади та прирости температур протягом всього процесу випалювання.

Формулювання цілей статті У зв'язку з наведеним вище матеріалом, метою даної статті є формулювання задачі оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів. Яка повинна передбачати комплексне вирішення питань енергозбереження та забезпечення потрібної якості кінцевої продукції.

Добре відомо [6,8 – 15], що всі техніко – економічні показники процесу випалювання вуглецевих виробів пов'язані з температурним режимом його реалізації. Тому у подальшому будемо виходити з двох умов ведення процесу:

1) температурний графік та тривалість процесу задані наперед;

2) температурний графік та тривалість процесу невідомі і підлягають визначенню у реальному часі з метою досягнення високих техніко-економічних показників випалювання та потрібної якості кінцевої продукції.

Температурний графік та тривалість процесу випалювання задані.

Перш за все, коли говоримо про температурний графік, треба визначити про яку температуру і в якій точці печі йде мова. Враховуючи значну розподіленість температурного поля печі випалювання [12, 15 – 19], у різних точках печі температури та графіки їх зміни будуть суттєво відрізнятися.

За результатами попередніх досліджень [12, 16-19] видається доцільним з точки зору досягнення потрібної якості вуглецевих виробів у якості «контрольної точки» вибрати нижню

точку заготовки з найнижчою температурою.

Зрозуміло, що виміряти температуру всередині заготовки неможливо, але, як свідчать результати проведених досліджень [6,16 – 19], температура пересипки біля заготовки практично не відрізняється від температури самої заготовки, температуру пересипки можна виміряти. Крім того, як буде показано нижче, при даній постановці задачі температуру всередині заготовки можна просто розрахувати за моделлю [6, 12, 15].

Перш за все потрібно з'ясувати яким чином можуть бути сформовані температурний режим та тривалість процесу випалювання. Що стосується останньої, то вона лежить у діапазоні 360 – 480 годин [6,12] і при даних початкових умовах може бути визначена тільки оператором – технологом. Він же може сформулювати і температурний графік процесу випалювання, як про це вказувалось вище. Але такий підхід безумовно є суб'єктивним і його результативність залежить від кваліфікації оператора – технолога.

Наразі пропонується інший підхід, виходячи із рекомендацій щодо швидкості підвищення температури, наданих у [6, 12]. Знаючи початкову температуру і приймаючи певний закон зміни температури у процесі випалювання (лінійний, кусково – лінійний, лінійний з насиченням тощо) можна сформулювати шуканий температурний графік. При цьому тривалість процесу випалювання має бути задана.

У такій постановці задача оптимального керування процесом випалювання являє собою задачу лінійно – квадратичного керування з відомим критерієм оптимальності [20 – 24].

$$I = \int_0^{T_k} [q(T(\tau) - T_{зад}(\tau))^2 + ru^2(\tau)] d\tau \quad (1)$$

або у дискретному вигляді

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

де T_k – тривалість процесу випалювання, $T(\tau)$, $T(k)$ – температура у контрольній точці в момент часу $0 \leq \tau \leq T_k$ і дискретний момент часу k відповідно;

$T_{зад}(\tau)$, $T_{зад}(k)$ – задана температура у контрольній точці у момент часу τ та у дискретний момент k відповідно;

q, r – параметри налаштування ЛК – регулятора;

$T_K = N\Delta\tau$ ($\Delta\tau$ – крок дискретизації).

При наявності математичної моделі процесу випалювання, наприклад [6, 12, 25], оптимальний закон керування u_{opt} може бути розрахований на початку термічної обробки заготовок у «камері під вогнем», використовуючи стандарте про-

грамне забезпечення [26], і керування процесом випалювання може бути реалізоване у вигляді програмного керування.

Такий спосіб керування має свої недоліки. По – перше, тривалість процесу випалювання задається суб'єктивним чином, що може призвести до погіршення техніко- економічних показників процесу та якості вуглецевих виробів.

Слід зазначити, що елемент «суб'єктивності» у визначенні тривалості процесу випалювання можна усунути, використавши зміну ентропії вуглецевих виробів як критерій тривалості процесу [27]. При такому підході розрахувати потрібну тривалість можна, використовуючи наступний ітераційний алгоритм.

1) задати початкову тривалість T_n , яка наперед менша за потрібну ($T_n < 360$ год.);

2) розв'язати задачу (1) або (2);

3) розрахувати значення температури у контрольній точці наприкінці кампанії процесу випалювання;

4) розрахувати відповідне значення ентропії E_K ;

5) знайти різницю ентропії наприкінці процесу випалювання E_K та на попередньому кроці E_{K-1} ;

6) якщо $\Delta E = E_K - E_{K-1} \leq 0$, то T_n – потрібна тривалість процесу випалювання;

7) якщо $\Delta E > 0$, то $T_n = T_n + \delta\tau$ ($\delta\tau$ – крок дискретизації) $E_{K-1} = E_K$ та перейти до п. 2.

По – друге, у разі відключення електроживлення, що сьогодні не є чимось незвичним, подальше керування процесом випалювання стає проблемним.

По – третє, 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).

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

Температурний графік і тривалість процесу невідомі.

Усі перелічені вище недоліки програмного керування можна ліквідувати у системі оптимального керування реального часу. Для реалізації такої системи потрібно розмістити термопару у пересипці поблизу нижньої частини заготовки у зоні з мінімальною температурою [6], та дві термопари у пересипці біля верхньої та нижньої частини заготовки, яка знаходиться у зоні з максимальною температурою [6]. Останні термопари

потрібні для вимірювання різниці температур у заготовці з максимальним їх перепадом.

Термопара у зоні з мінімальною температурою дає можливість, по – перше, враховувати усі можливі збурення (названі вище), по – друге, визначити момент доцільного завершення процесу випалювання на підставі розрахованого значення зміни ентропії.

Одним із сучасних методів аналізу та синтезу систем керування є модельно – прогнозує керування Model Predictive Control (MPC) [28-32]. У нас час область застосування MPC – методів суттєво розширилася та охоплює такі галузі як хімічну, машинобудівну, аерокосмічну, харчову та інші.

Основною перевагою MPC – підходу, яка визначає його успішне використання у практиці побудови та експлуатації систем керування, служить відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку разом з високими адаптивними властивостями. Остання обставина дозволяє керувати багатовимірними та багатозв'язними об'єктами із складною структурою, що включає нелінійності, оптимізувати процеси у режимі реального часу з урахуванням обмежень на керуючі та керовані змінні, враховувати невідзначеності у завданні об'єктів та збурень.

Саме тому для створення системи оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів доцільно використати MPC – підхід. Як критерій оптимальності будемо використовувати наступний вираз у дискретному вигляді.

$$J = \sum_{k=1}^{N_H} q[(T(k) - T_{\text{зад}}(k))]^2 + \sum_{k=0}^{N_K} r u^2(k) + \sum_{k=1}^{N_H} \frac{1}{(\Delta T(k) - \Delta T_{\text{дон}}(k))} \quad (3)$$

де N_H , N_K – горизонти прогнозування та керування відповідно;

$\Delta T(k)$, $\Delta T_{\text{дон}}(k)$ – перепад температур поточний та допустимий відповідно.

Для розв'язання задачі (3) треба застосувати пошукові методи оптимізації [33-35].

Умовою закінчення процесу випалювання (тривалість процесу), як і раніше є $\Delta E \leq 0$.

Ще однією перевагою MPC – підходу по відношенню, скажімо, до ПІД – керування є можливість планування виробництва, що обумовлено розрахунком температур на N_H кроків вперед. При цьому з'являється можливість обчислення значень ентропії вуглецевих виробів, що означає можливість визначення заздалегідь моменту завершення процесу випалювання.

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

Висновки

У статті сформульована задача оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів. На відміну від відомих систем керування даним процесом запропоновані підходи дозволяють забезпечити режим найбільш ефективного використання енергоносіїв при зменшенні кількості бракованої продукції.

Запропоновані 2 підходи до побудови системи оптимального керування – програмне керування та керування у реальному часі.

Показані недоліки системи програмного керування, указані шляхи їх ліквідації у системі реального часу.

Обґрунтована доцільність використання модельно – прогнозуючого керування (МРС – підхід) для системи оптимального керування процесом випалювання.

Напрямки подальшої роботи пов'язані з експериментальними дослідженнями запропонованих систем, їх оптимальними налаштуваннями та аналізом їх ефективності у порівнянні з відомих системами керування.

Список літератури:

1. Сошкин С. Система управления процессом обжига электродных материалов // С. Сошкин, А. Антонян, Г. Полторац, Н. Сорокин // Системная интеграция. Металлургия. 2006, №3, с. 26-30.
2. Сошкин С.В. К возможности создания импульсной системы сжигания топлива для камерных печей. Цветная металлургия, 1998, № 3, с. 55-58.
3. Сошкин С.В. Проектирование оптимальной системы управления обжигом электродных изделий в камерных печах. Цветная металлургия, 1998, с. 68-72,
4. Сошкин С.В., Априамов В.Н., Жуковецкий О.В. Цветные металлы, 1987, № 9. 59. Сошкин С.В. Системы оптимального управления обжигом электродных заготовок. Цветные металлы, 1998, № 3, с. 66-70.
5. Сошкин, Григорий Станиславович. Исследование процесса обжига электродной продукции в многокамерных печах и разработка системы оптимального управления : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.06 / Сошкин Григорий Станиславович; [Место защиты: Сев.-Кавказ. Гор.-металлург. Ин-т]. Владикавказ, 2012. 178 с.: ил. РГБ ОД, 61 12-5/3751.
6. Коротинський А.П. Автоматизація процесу керування багатоканальними печами випалювання вуглецевих виробів: дис. на здобуття наук. ступеня докт. філософії : спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / А. П. Коротинський. К., 2020. 190 с.
7. A system of automated control for the baking process that minimizes the probability of defects / A. Korotynskiy, O. Zhuchenko // Международный наукометрический научный журнал "СхідноЄвропейський журнал передових технологій". 2020/ № 1/2(103), с. 58-67.
8. Коротинський А.П. 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.
9. Шулепов С. В. Физика углеродистых материалов / С. В. Шулепов. М. : Металлургия, 1972. 256 с.
10. Чалых Е. Ф. Обжиг электродов / Е. Ф. Чалых. М. : Металлургия, 1981. 116 с.
11. Чалых Е. Ф. Технология углеродистых материалов / Е. Ф. Чалых. М. : Металлургиздат, 1963, 304 с.
12. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеродистых изделий : монография / И.В. Пулинец [и др.] ; Мин-во образования и науки Украины, НТУУ «КПИ». Киев : НТУУ «КПИ», 2014, 175 с.
13. Исследование обжига углеродистых заготовок / Молокова Т. Л., Харлампович Г. Д., Сухоруков И. Ф. // Химия твердого топлива. 1977, № 6, с. 114–120.
14. Малахов С. А. Совершенствование технологии обжига углеродистой продукции в многокамерных печах обжига закрытого типа: автореф. Дис. На соиск. Учен. Степени канд. Техн. Наук : спец. 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / С. А. Малахов. Владикавказ, 2004. 30 с.
15. Повышение эффективности обжига углеродистых заготовок / Е. Н. Панов, А. Я. Карвацкий, И. Л. Шилович, С. В. Лелека, И. В. Пулинец [и др.] // Вісник НТУУ «КПИ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження : зб. наук. праць. 2011, № 1(7) додаток. с. 25–30.
16. Коротинський А.П. 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.
17. Коротинський А.П. Дослідження впливу надлишку повітря на процес випалювання вуглецевих виробів у камері "під вогнем" / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. 2018, № 1, с. 119-128.
18. Коротинський А.П. Дослідження впливу початкової температури повітря на температурний режим процесу випалювання вуглецевих виробів у камері "під вогнем" / О. А. Жученко, А. П. Коротинський // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія : Технічні науки. 2018. Вип. 36. 201-209.

19. 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 Наукове видання № 4 (478) 2019, С. 3-10.
20. Жосан А. А., Кірсань Є.С. Аналіз методів моделювання об'єктів з розподіленими/ А.А. Жосан, Є.С. Кірсань // Вісник Криворізького національного університету, вип. 34, 2013
21. Иваненко В. И. Вариационные методы в задачах управления для систем с распределенными параметрами / В. И. Иваненко, В. С. Мельник. К: Наук. думка, 1988, 288 с.
22. Демиденко Н. Д. Моделирование и оптимизация систем с распределенными параметрами / Н. Д. Демиденко, В. И. Потапов, Ю. И. Шокин. Новосибирск : Наука, 2006. 551 с.
23. Булавацький В. М. Некласичні математичні моделі процесів тепло – та масопереносу / В. М. Булавацький, Ю. Г. Кривонос, В. В. Скопечкий. – К.: Наукова думка, 2005. – 284 с.
24. Бутковский А. Г. Характеристика систем с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский. М: Наука, 1979. 224 с.
25. Korotynskiy A. Development and investigation of the reduced mathematical model of the process of baking carbon products / O. Zhuchenko, A. Korotynskiy // Международный наукометрический научный журнал "Східно-Європейський журнал передових технологій". – 2019/ – № 1/8(97). с. 70-78.
26. Yeong Koo Yeo. Chemical Engineering Computation with MATLAB 2nd Edition RC Press; 2nd edition (December 16, 2020), 847 p.
27. Жученко Л.К. Ентропія як показник якості вуглеграфітової продукції / Жученко Л.К., Коротинський А. П. // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики : XIX міжнар. наук.-прак. конф. аспірантів, магістрантів і студентів, 20-23 кв. 2021р.: мат. конф.К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
28. L. Wang. Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB. Springer, 2009. 376 p.
29. Денисенко Н. А., Рогачёв А. И., Караман Д. Г. Применение пакета MATLAB для решения задач управления с прогнозированием // Вестник НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ». 2006. № 9, с. 30–33.
30. Денисенко Н.А. Задачи оптимального управления с прогнозированием при квадратичном функционале // Н.А.Денисенко, А. И. Рогачёв / Вісник Вінницького політехнічного інституту: Вінниця. 2006. № 6, с. 10-13.
31. Samacho E. F., Bordons A. C. Model predictive control / Springer. 2007. P. 405
32. Северілов В. А. Узагальнення задач оптимального управління розподіленням ресурсів в часі / В. А. Северілов, І. С. Колесник // Доповіді МНК «Контроль і управління в технічних системах», Вінниця, 2001. с. 142–146.
33. Wade H. Basic and Advanced Regulatory Control: System Design and Application, Third Edition / International Society of Automation. 2017. P. 567.
34. Андреева Е. А. Вариационное исчисление и методы оптимизации / Е. А. Андреева, В. М. Цирулева. М. : Высшая школа, 2006, 584 с. ISBN 5-06-004746-6.
35. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: в 2-х книгах. Книга 1: Пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Регсдел. М.: Мир, 1986, 350 с.

Zhuchenko L.K. STATEMENT OF THE PROBLEM OF OPTIMAL CONTROL OF THE FORMATION PROCESS OF CARBON PRODUCTS

The article formulates the problem of optimal management of the process of burning carbon products. One of the main technological processes in the production of carbon products is the firing process. This process is characterized on the one hand by energy consumption, and on the other hand by a significant amount of defective products that do not meet the necessary requirements.

In connection with these needs, the scientific and technical task of increasing the efficiency of the process of burning carbon products is urgent, which leads to a decrease in energy consumption and ensuring the necessary quality of the final products. One of the effective ways to solve this problem is to create a modern system of optimal control of the firing process

In contrast to known control systems for this process, the proposed approaches allow to ensure the mode of the most efficient use of energy carriers while reducing defective products.

2 approaches to creation an optimal control system are proposed – software control and real-time control.

The shortcomings of the software control system are shown, and the ways of their elimination in the real-time system are indicated. The expediency of using model-predictability of the control process (MRS-approach) for optimal control of the firing system is substantiated.

Key words: carbon products, optimal control system, software control, real-time control, model-predictive control.