

УДК 621.5

С. М. Москвіна, к. т. н., доц.;

Д. О. Ковалюк, асп.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО ОБ'ЄКТА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Розглянуто проблеми моделювання теплових об'єктів з розподіленими параметрами на прикладі тунельної печі випалювання керамічних виробів. Запропоновано нечітку модель такого теплового об'єкта та метод уточнення її параметрів, який дозволяє розраховувати оптимальні щодо енергозбереження значення температурного поля для отримання максимальної якості виробів.

Вступ та актуальність проблеми

Сьогодні широкого розповсюдження в енергетиці, металургії, хімії, промисловості будівельних матеріалів набули складні теплові об'єкти з розподіленими параметрами (ОРП) [1]. Одним класом технологічних процесів, які протікають в таких об'єктах, є процеси випалювання [2], що характеризуються направленим пересуванням оброблюваного матеріалу та нагріванням його під дією зовнішнього температурного поля. Задача оптимізації даного класу теплових процесів полягає у підтриманні певного температурного режиму по довжині печі, а для її розв'язання необхідні математичні моделі, що описують теплові процеси.

Математична модель процесу випалювання

Розглянемо структурну схему та математичні моделі процесу випалювання, суть якого в такому. Через нагрівальну піч довжиною L (рис. 1) неперервною смугою проходить матеріал зі швидкістю v . Просуваючись вздовж печі від її входу до виходу, матеріал нагрівається під дією температурного поля печі. Якщо температурне поле печі рівномірне, тобто, в кожний момент часу t розподіл $u(t)$ температури в печі не залежить від координати x , то розподіл температури смуги матеріалу, що нагрівається, $Q(x, t)$ та $u(t)$ зв'язані лінійним диференціальним рівнянням першого порядку в частинних похідних

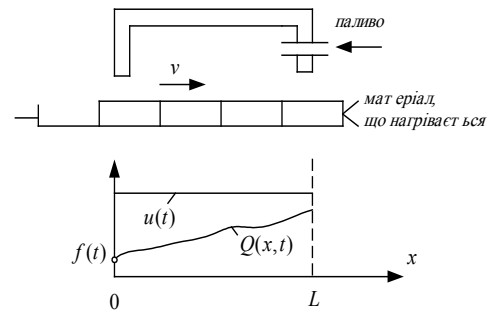


Рис. 1. Схема процесу випалювання

$$b \frac{\partial Q}{\partial t} + v \frac{\partial Q}{\partial x} = \alpha(u - Q), \quad (1)$$

де b — стала часу нагріву кожного перерізу матеріалу, перпендикулярного до осі x ; α — коефіцієнт теплообміну між температурним середовищем та матеріалом, що нагрівається.

Іншим прикладом процесу випалювання [3] є випадок коли температурне поле печі не є рівномірним (теплообмінники). Якщо позначити розподіл температур нагрівального агента через $Q_1(x, t)$, а розподіл температур агента, що нагрівається, — $Q_2(x, t)$, то рівняння, що описує зміну $Q_1(x, t)$ в вибраній системі координат, буде мати вигляд

$$\frac{\partial Q_1(x, t)}{\partial t} + v_1(x) \frac{\partial Q_1(x, t)}{\partial x} + \alpha_1(x) Q_1(x, t) = f_1(x, t), \quad 0 < x < l, \quad t > 0, \quad (2)$$

де $v_1(x)$ — швидкість руху нагрівального агента в додатному напрямку x ; $\alpha_1(x)$ — коефіцієнт теплообміну нагрівального агента з зовнішнім середовищем, $f_1(x, t)$ — загальний потік тепла, що втікає до нагрівального агента.

Аналогічні рівняння можна записати для агента, що нагрівається:

$$\frac{\partial Q_2(x, t)}{\partial t} \pm v_2(x) \frac{\partial Q_2(x, t)}{\partial x} + \alpha_2(x) Q_2(x, t) = f_2(x, t), \quad (3)$$

де знак «плюс» перед другим доданком береться у випадку прямогоку (знак «мінус» — у випадку протитоку).

Проблеми моделювання теплових об'єктів з розподіленими параметрами

Аналіз математичних моделей процесу випалювання [1, 2] показав, що їх використання для моделювання процесу випалювання є цілком виправданим та перевіреном на практиці. Проте, дані моделі не дозволяють забезпечити максимальну ефективність процесу випалювання, яка визначається співвідношенням між витратами та якістю кінцевої продукції. Типовим прикладом є випадки отримання низької якості виробів з високими (сталими) енергетичними витратами. Основною причиною є те, що існуючі моделі процесу випалювання не враховують факторів всього технологічного процесу, починаючи від формування виробів і закінчуючи показниками якості продукції, а тому не можуть оперативно реагувати (перенастроювати параметри процесу) на збурювальні впливи, пов'язані зі зміною температури і вологості повітря для охолодження, теплотворної здатності природного газу, властивостей сировини, відхиленнями в підготовці напівфабрикату виробів, роботою обслуговуючого персоналу та технологічного обладнання. Таким чином, можна зробити висновок, що основною проблемою моделювання теплових ОРП є неврахування нестабільності сировини, змін режимів роботи попередніх стадій виробництва, мінімізації енергетичних витрат (згідно державних програм енергозбереження), що не дозволяє розв'язувати задачу пошуку оптимального режиму випалювання для певного виду продукції і отримати максимальну ефективність всього процесу.

Метою роботи є підвищення ефективності моделювання теплових ОРП, зокрема процесу випалювання, за рахунок розробки математичної моделі енергозбереження, що дозволяє визначати оптимальні параметри моделі теплового ОРП.

Алгоритм оптимізації

Для розв'язання поставленої задачі в роботі запропоновано метод визначення оптимальних параметрів моделі теплотехнологічного ОРП (рис. 2) на основі значень поточного стану ТП, що є можливим завдяки чіткому технологічному регламенту проходження ТП, послідовністю етапів та взаємозалежністю їх результатів, наявністю контрольних точок, що дозволяють отримати інформаційну базу.

Ідея методу полягає в тому, що на основі значень параметрів ТП необхідно спрогнозувати максимально можливий клас якості продукції і знайти оптимальні, з точки зору мінімізації енергетичних витрат, значення температурного поля — уточненні параметри моделі теплотехнологічного ОРП, з якими досягається заданий клас якості.

Так, наприклад, для процесу виготовлення будівельної кераміки марка міцності цегли (клас якості) присвоюється, якщо усереднене значення міцності виробів потрапляє у відповідний інтервал. Тому, згідно запропонованого методу визначення оптимальних параметрів, необхідно знайти такі значення температурного поля, при яких досягається нижня межа максимально можливого класу міцності виробів. Для марки виробів «125» середнє значення міцності повинне знаходитися в інтервалі [100...125), причому, мінімальні енергетичні витрати для отримання даної марки будуть в тому випадку, якщо значення міцності дорівнюватиме нижній границі даного інтервалу — 100 МПа.

Метод визначення оптимальних параметрів моделі теплотехнологічного ОРП реалізується за таким алгоритмом:

1. Прогнозування максимально можливого класу якості продукції, що здійснюється з використанням логіко-імовірнісної моделі (блок «ЛІ-модель визначення класу продукт.», рис. 2). Враховуючи специфіку даного теплотехнологічного об'єкту, на нашу думку, при визначенні класу якості необхідно враховувати ризик прийняття рішень в процесі управління, що зумовлено складністю та аварійністю об'єкту, значною інерційністю каналів управління внаслідок необхідного прогрівання значної маси виробів, неможливістю оперативного контролю властивостей цегли під час випалювання, розподілом температури газового середовища вздовж випалювального каналу, великою кількістю збурень, що призводять до порушення температурного поля печі, можливими порушеннями, що навіть за короткий час спричиняють значні матеріальні збитки.

2. Знаючи максимально можливий клас якості, знаходиться нижня межа для даного класу та з використанням моделі всього технологічного процесу (блок «нейромодель прогнозування якості», рис. 2) та моделі оптимізації (блок «модель оптимізац.», рис. 2) розв'язується задача оптимізації відносно значень температурного поля T :

$$f(T(U)) \rightarrow \min; \tag{4}$$

$$\begin{cases} MM_Class(H, T) = Class_{max}; \\ MM_Mitsnist(H, T) = M_{min}|_{CLASS_{max}}; \\ W_{min} \leq W \leq W_{max}, \end{cases} \tag{5}$$

де $f(T(U))$ — критерій ефективності, що враховує зв'язок температури та енергетичних витрат для її підтримання; MM_Class — математична модель класифікації класу якості виробів; $MM_Mitsnist$ — математична модель ТП виготовлення кераміки; H — вектор параметрів сировини та етапів підготовки виробів; W_{min} , W_{max} — нижні і верхні межі зміни технічних параметрів системи керування W .

3. Уточнені параметри моделі теплотехнологічного ОРП — T_{opt} , отримані на попередньому кроці, використовуються в моделі теплотехнологічного ОРП (блок «Модель ТТОРП», рис. 2) для моделювання температурного поля об'єкта «ОУ» та реалізуються блоком управління «БУ».

4. У випадку неможливості підтримання розрахованої температурної кривої з технічних причин (наприклад, вихід з ладу пальників на окремих позиціях), в методі передбачена можливість оперативного коригування температурного поля за допомогою регресійної моделі якості (блок «регресійна модель прогнозування якості», рис. 2), на вхід якої, крім параметрів сировини з блоку управління, надходять ще значення температурного поля, що були реалізовані на попередніх позиціях.

5. Після завершення процесу випалювання визначається реальна якість продукції $Q_{реал}$ (блок «Визначення якості», рис. 2) та

порівнюється з прогнозованою якістю $Q_{прогн}$. У випадку, якщо різниця $Q_{реал} - Q_{прогн}$ перевищують задане граничне відхилення, виконується процедура коригування нейромережевої моделі прогнозування якості (блок «Коригування моделі», рис. 2), з використанням навчання за отриманими новими даними ТП.

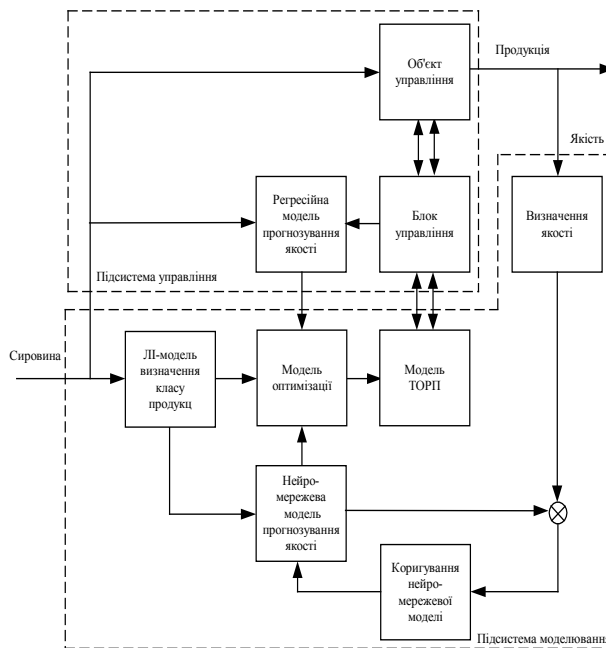


Рис. 2. Структурна схема методу

Нечітка модель процесу випалювання

В якості моделі теплового об'єкта з розподіленими параметрами запропоновано нечітку модель, оскільки вона відносно нескладна і придатна для використання в існуючих АСУТП, що працюють в реальному масштабі часу. Для розробки нечіткої моделі управління проведемо аналіз факторів, що впливають на температури позицій печі. Використовуючи математичну модель температурного поля позиції печі, основу на рівняннях теплового балансу, для моделі відберемо фактори (рис. 3), що характеризують умови протікання теплових процесів на поточній та попередній позиції, а також враховують рух повітря по каналу печі. Використовуючи підхід, запропонований в роботі [7], представимо класифікацію факторів впливу у вигляді ієрархічного дерева, що дозволяє зменшити кількість правил у базі.

На сьогодні технологія побудови нечітких моделей детально описана в роботах [7—8]. Вона передбачає виконання таких етапів: фазифікація факторів, побудова нечітких матриць знань, вибір та реалізація алгоритму нечіткого логічного висновку та дефазифікація вихідного показника.

Структурна ідентифікація. Враховуючи той факт, що складність задачі оптимізації залежить від кількості параметрів функцій належності, за функції належності вхідних факторів вибрано гаусівські функції

$$\mu^t(x) = \exp\left(-\frac{(x-z)^2}{2c^2}\right), \quad (6)$$

де $\mu^t(x)$ — функція належності фактора x нечіткому числу t ; z та c — параметри функції належності: координата максимуму і коефіцієнт концентрації відповідно.

За алгоритм нечіткого виводу використовується алгоритм Мамдамі, послідовне застосування якого до дерева виводу дозволяє обчислити нечітку множину ΔV для вихідної зміни об'єму палива в заданій точці факторного простору

$$\overline{\Delta V}(x_1 - x_4, y_1) = \left\{ \frac{\mu^{\Delta V_1}(\Delta V)}{d_1}, \frac{\mu^{\Delta V_2}(\Delta V)}{d_2} \dots \frac{\mu^{\Delta V_l}(\Delta V)}{d_l} \right\}, \quad (7)$$

де l — кількість нечітких термів для оцінки змінної ΔV ; ΔV_i — назва i -го терму; $i = \overline{1, l}$, $\mu^{\Delta V_i}(\Delta V)$ — степінь належності змінної ΔV до терму ΔV_i ; d_i — кількісне значення змінної ΔV для терму ΔV_i .

Параметрична ідентифікація. Для проведення параметричної ідентифікації використовувалася навчальна вибірка, сформована з статистичних даних таким чином: фіксуються всі значення вимірених факторів $x_1 - x_7$ і об'єм газу, встановлений для зміни поточної температури. Оскільки вимірювання температури проводиться із заданою періодичністю, то через певний інтервал часу фіксується нове значення температури даної позиції і розраховується значення ΔT . Таким чином, навчальна вибірка показує, наскільки зміниться температура зони через певний інтервал часу, зі зміною об'єму газу на ΔV (за сталих значень всіх інших факторів), і є сукупністю пар типу

$$\Delta T = F(y_1, x_1 - x_4, \Delta V). \quad (8)$$

Зауважимо, що оскільки нечітка модель відображує залежність об'єму газу від температури, то навчальна вибірка без втрати адекватності трансформується до вигляду $\Delta V = F(x_1 \dots x_7, \Delta T)$.

Позначимо через P вектор параметрів функцій належності термів вхідних і вихідної змінних нечіткої моделі і через W — вектор вагових коефіцієнтів правил бази знань, тоді настроювання нечіткої моделі типу Мамдамі зводиться до розв'язання такої задачі математичного програмування: знайти такий вектор (P, W) , щоб

$$\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (y_r - F(P, W, X_r))^2 \rightarrow \min, \quad (9)$$

де (X_r, Y_r) , $r = \overline{1, M}$ — вибірка експериментальних даних, що зв'язує входи X з виходом u досліджуваної залежності; $F(X_r)$ — значення виходу нечіткої моделі при значенні входів, заданих вектором X_r .

Зазначимо, що задача (9) відноситься до задач нелінійної оптимізації, і була розв'язана програмним шляхом

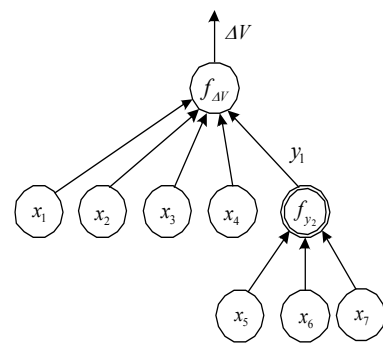


Рис. 3. Фактори процесу випалювання: x_1 — абсолютне відхилення температури T від заданої T_3 на поточній позиції печі, °C; x_2 — швидкість зміни температури, °C; x_3 — теплотворна здатність палива, Дж/м³; x_4 — температура повітря попередньої зони, °C; x_5 — кількість повітря, що вносився в наступну позицію; x_6 — витрати палива на поточній позиції, м³/с; x_7 — температура матеріалу в поточній зоні, °C

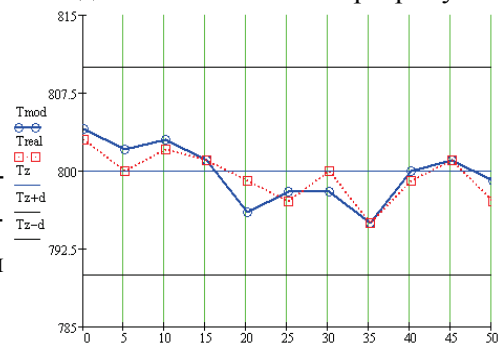


Рис. 4. Результати моделювання температури

з використанням інструментарію Optimization Toolbox математичного пакету Matlab. Результати застосування нечіткої моделі були перевірені на позиції № 15 тунельної печі, температура якої в статичному режимі дорівнює 800 °С. Графіки розрахованої за моделлю та реальної температури показано на рис. 4, точність моделі склала 93 %.

Висновки

1. Проаналізовано основні проблеми, що виникають в процесі моделювання теплових об'єктів з розподіленими параметрами.

2. Розроблено нечітку математичну модель теплового об'єкта з розподіленими параметрами (тунельної печі випалювання), яка характеризується меншою складністю, може бути використана в реальних системах управління процесом випалювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Высокотемпературные технологические процессы и установки / под ред. Лисиенко В. Г. — Минск: Высшая школа, 1988. — 320 с.
2. Москвіна С. М., Ковалюк Д. О. Моделювання процесу випалювання цегли // Вісник Вінницького політехнічного інституту — 2005. — № 6 — С. 62—68.
3. Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределёнными параметрами. — М.: Наука, 1975. — 568 с.
4. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределёнными параметрами. Учебное пособие. — М.: Высшая школа, 2003. — 298 с.
5. Бутковский А.Г. Структурная теория распределённых систем — М.: Наука., 1977. — 320 с.
6. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. — 608 с.
7. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии в идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. — Винница: Континент-ПРИМ, 1999. — 300 с.
8. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>, 2002.

Матеріали статті рекомендовані до опублікування оргкомітетом Всеукраїнської науково-технічної конференції «Альтернативні екологічно чисті та відновлювальні джерела енергії» (30.05—1.06.2007 р.)

Надійшла до редакції 30.06.07
Рекомендована до друку 02.07.07

Москвіна Світлана Михайлівна — доцент, **Ковалюк Дмитро Олександрович** — аспірант.

Кафедра комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет