

УДК 66.012—52

С. М. Москвіна, к. т. н., доц.;

Д. О. Ковалюк, асп.;

С. А. Білоконь, асп.

УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМИ ПРОЦЕСАМИ НА ОСНОВІ НЕЙРО-НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ

Розглянуто основні підходи до моделювання теплових об'єктів з розподіленими параметрами, розроблено математичну модель оптимізації теплового поля на прикладі тунельної печі технологічного процесу виготовлення кераміки. Отримано нейронну та регресійну математичні моделі даного технологічного процесу, розроблено логіко-імовірнісну модель класифікації марки виробів.

Вступ та актуальність проблеми

В сучасних умовах використання систем управління є невід'ємною частиною будь-якого технологічного процесу. Особливо це стосується складних енергоємних виробництв з великим об'ємом випуску продукції, прикладом яких є процес виготовлення будівельної кераміки (цегли). Основною ланкою таких виробництв, як правило, є теплові процеси, що формують основні витрати та показники якості продукції і протікають в печах випалювання, найбільш поширеними з яких є тунельні печі.

Такі печі є типовими об'єктами з розподіленими параметрами і мають ряд особливостей. До них перш за все відносяться [1]: великі затрати енергії, високі вимоги до підтримання просторово-часових температурних режимів, сильні зв'язки між змінними станів в сусідніх ділянках печі, значна кількість управляючих і збурювальних впливів, висока інерційність, ймовірність виходу з ладу нагрівальних елементів в процесі експлуатації печі. Крім того, на температури зон печі накладаються обмеження, що виходять з технічних вимог і технологічного регламенту, в тому числі пов'язані з протіканням хімічних реакцій.

Зазначимо, що задача управління такими тепловими процесами зводиться до підтримання певного температурного режиму. Для розв'язання цієї задачі необхідна наявність адекватних математичних моделей, що описують теплові процеси.

Аналіз існуючих математичних моделей управління тепловими процесами

Оскільки багатозонні печі є тепловими об'єктами з розподіленими параметрами, то для отримання моделі динаміки в основному використовуються три підходи: перший – пов'язаний з отриманням аналітичного рішення моделі у вигляді диференційних рівнянь в частинних похідних, другий – передбачає заміну системи з розподіленими параметрами декількома об'єктами з зосередженими параметрами з подальшою оцінкою цих параметрів диференційними рівняннями обмеженої розмірності за експериментальними даними. Третій підхід оснований на числових методах розв'язання задачі теплообміну з використанням методу кінцевих елементів.

Перевагою аналітичних методів є висока точність отриманих моделей, однак їх важко використовувати в мікропроцесорних системах. Математичні моделі, побудовані на основі експериментально отриманих даних про температурні режими об'єкта, не завжди враховують всі особливості конкретного теплового об'єкта, наприклад, конфігурацію поля температур в усьому об'єкті, що має декілька робочих зон. Використовуючи числові методи розв'язання, отриманий розподіл температур важко застосовувати для синтезу оптимального управління в реальному часі, однак перевагами таких методів є універсальність і наочність результатів.

Аналіз відомих математичних моделей, проведений в [2], засвідчив, що дані моделі розв'язують задачу управління лише частково, оскільки на основі розподілу температурного поля по довжині печі та всередині виробів визначають параметри управління для підтримання заданої форми температурної

кривої. Проте підтримання форми температурної кривої є явно недостатнім, оскільки складність процесу випалювання обумовлена фізико-хімічними перетвореннями, збурюючі впливи, пов'язані зі зміною властивостей сировини, відхиленнями в підготовці напівфабрикату виробів, вимагають постійного коригування температурного режиму. Крім того, ефективність теплових процесів визначається співвідношенням витрат та показників якості виробів, які безпосередньо залежать від температурної кривої, тому для здійснення оптимального управління необхідно провести дослідження показників якості виробів від значень температурного поля, тобто розробку моделей оптимізації температурного поля, які отримують свій розвиток останнім часом [3]. Враховуючи вищесказане, задачу оптимального управління сформулюємо таким чином: знайти такі параметри управління, які дозволяють отримати максимально можливу якість виробів при мінімальних витратах.

Метою роботи є розробка математичної моделі оптимізації температурного режиму тунельної печі, яка дозволяє визначити температурне поле та параметри управління для його підтримання, при якому досягаються максимальні показники якості при мінімальних витратах.

Вибір критерію ефективності

Для розв'язання задачі оптимізації сформулюємо критерій ефективності теплового процесу, який виступатиме цільовою функцією (ЦФ) в математичній моделі оптимізації. В якості критерію ефективності візьмемо співвідношення

$$\frac{E_1}{E_2} \rightarrow 1, \quad (1)$$

де E_1 — кількість теплоти, необхідна для протікання процесу випалювання; E_2 — кількість виробленої теплоти, що надходить в піч.

Зазначимо, що кожна позиція печі випалювання виступає як окремий елемент, який характеризується своїм значенням температурного поля та параметрів управління, тому тунельну піч можна розглядати як систему послідовно з'єднаних позицій. З урахуванням цього критерій ефективності можна розглядати як суму енергетичних витрат по n позиціях $\sum E_{1i}/E_{2i} \rightarrow 1$. Зазначимо, що кількість позицій повинна вибиратися виходячи з можливості управління температурним полем (наявність пальників).

Для використання формули (1) необхідно отримати аналітичні вирази E_{1i} та E_{2i} , для чого скористаємося рівняннями теплового балансу тунельної печі. В цьому випадку кількість теплоти, що надходить на позицію (кількість теплоти, що вноситься з попередньої зони, кількість теплоти від згорання палива) повинна дорівнювати кількості теплоти, що витрачається на даній позиції (теплота, що поглинається виробами, теплота, що виноситься у наступну зону випалювання). Використовуючи відповідні формули, наведені в роботі [4], критерій (1) буде мати такий вигляд:

$$\sum \left(c_{in} G_{in} T_{in} + (q_c + I_b + L_{lb} I_{lb}) G_b - c_c G_c T_c - \alpha_1 H_z L (T_c^4 - T_z^4) \right) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де c — теплоємність димових газів, G — витрата димових газів, T — температура димових газів, G_b — витрати палива, L_{lb} — коефіцієнт витрати повітря, що йде на окислення палива, α_1 — приведений коефіцієнт випромінювання для системи теплоносій—керамічні вироби, L — довжина позиції випалювання, H_z — висота керамічної стінки, T_z — температура поверхні керамічної стінки, що межує з газовим простором, q_b — питома теплотворна здатність палива, I_b — ентальпія палива, I_{lb} — ентальпія повітря, що йде на окислення палива. Індексом позначено in — попередня позиція випалювання, c — поточна позиція.

Зауважимо, що характер температурного поля T_c^4 , T_z^4 визначається радіаційною складовою теплообміну між димовими газами та поверхнею виробів. Враховуючи, що теплоємність димових газів та температура сирцю залежать від температури газового простору, вираз (2) можемо записати

$$f(\mathbf{T}(\mathbf{U}), \mathbf{G}) \rightarrow \min, \quad (3)$$

тобто витрати ТП випалювання пов'язані з підтриманням певного температурного \mathbf{T} поля за допомогою параметрів управління \mathbf{U} і \mathbf{G} (витрати газу на пальники та швидкість переміщення газового простору). Як бачимо дана цільова функція повністю відповідає вимогам, висунутим до математичної моделі управління.

Метод оптимального управління

Як видно з критерію ефективності процесу випалювання, управління даним процесом повинно базуватися на підтриманні певної температурної кривої. Тоді оптимальне управління буде полягати у мінімізації деякої функції втрат G , що характеризує якість управління

$$G = G(T_{\text{оп}}^* - T_{\text{факт}}) = G(T_{\text{оп}}^* - T_{\text{факт}}(Z)), \quad (4)$$

де $T = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ — вектор температурного поля печі.

З формули (4) випливає, що необхідно отримати значення оптимального температурного поля $T_{\text{оп}}^*$. Оптимальний режим термічної обробки — це *найкоротший* режим термічної обробки, що проводиться за *найменшою* температури, при якій виріб отримує *найкращі* властивості. Оскільки випалювання відбувається при сталому інтервалі прошивування виробів, то оптимізація температурної кривої полягає у варіюванні значень температурного поля.

Розглянемо можливість варіювання температурного поля та його вплив на характеристики якості продукції. До таких характеристик відповідно до ГОСТ відносять механічну міцність при стисканні та згині, водопоглинення та морозостійкість, за значеннями яких і визначається марка цегли. Відзначимо, що основною з вказаних характеристик є міцність виробів, тому перш за все необхідно дослідити її залежність від значень температурного поля.

Як відомо, найбільше значення міцності M_{max} (а разом з ним відповідна марка виробів $Class_{\text{max}}$) досягається при найвищих значеннях температурного поля. Подальше варіювання (зменшення) значень температурного поля призводить до зниження міцності виробів. Згідно з поставленою задачею оптимізації, для отримання продукції максимальної якості зниження температурного поля можливе лише до певного граничного значення. Враховуючи те, що для кожної марки виробів значення показників якості знаходяться в певному інтервалі, то граничне значення міцності повинно дорівнювати найменшому значенню міцності для даного максимально можливого класу $M_{\text{min}}|_{CLASS_{\text{max}}}$. Тобто, знижуючи температуру, зменшуючи тим самим енергетичні витрати, ми отримуємо на виході ту ж саму марку виробів, проте з нижчим значенням міцності.

Крім того, задача оптимізації температурного поля містить також обмеження, пов'язані з технічними характеристиками системи керування паччю \mathbf{W} (швидкодія, точність, граничні можливості управляючих та вимірювальних органів), технологічні обмеження.

Враховуючи вищесказане, задачу оптимізації температурного поля запишемо у вигляді:

$$f(\mathbf{T}(\mathbf{U}), \mathbf{G}) \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$\begin{cases} MM_Class(\mathbf{H}, \mathbf{T}) = Class, \\ MM_Mitsnist(\mathbf{H}, \mathbf{T}) = M_{\text{min}}|_{CLASS}; \\ \mathbf{W}_{\text{min}} \leq \mathbf{W} \leq \mathbf{W}_{\text{max}}, \end{cases} \quad (6)$$

де MM_Class — математична модель класифікації марки виробів; $MM_Mitsnist$ — математична модель ТП виготовлення кераміки; \mathbf{H} — вектор параметрів сировини та етапів підготовки виробів; $\mathbf{W}_{\text{min}}, \mathbf{W}_{\text{max}}$ — нижні і верхні межі зміни технічних параметрів системи керування \mathbf{W} .

Таким чином, задача оптимізації температурного поля тунельної печі виготовлення будівельної кераміки являє собою оптимізаційну задачу, яка формулюється так: знайти мінімум функції втрат (5) при обмеженнях (6).

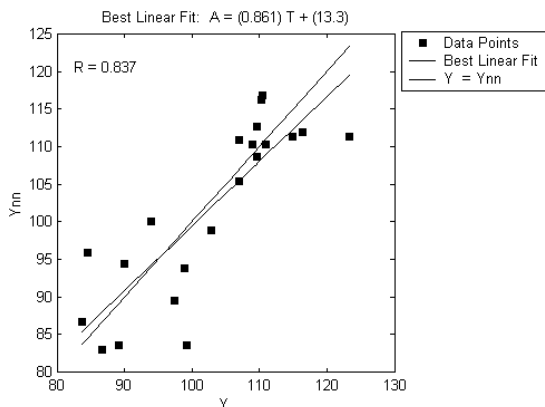
Розробка математичної моделі ТП виготовлення кераміки

Розглянемо складові моделі оптимізації. Для визначення міцності виробів фактично необхідно побудувати математичну модель ТП виготовлення кераміки. Відомо, що розробка математичної моделі об'єкта може бути вирішена методами регресійного аналізу, кореляції, планування експерименту. Ме-

тодика одержання математичних моделей технологічних систем за допомогою цих методів розроблена досить докладно й широко застосовується у виробництві. Разом з тим дослідження, проведені в [5, 6], показали ефективність застосування нейронних мереж (НМ) для задач прогнозування та управління технологічними процесами, можливість побудови на їх основі достовірних моделей складних нелінійних об'єктів і регуляторів, що реалізують різні закони управління. З огляду на це було прийнято рішення про використання апарату нейронних мереж та регресійного аналізу для побудови ММ міцності виробів.

Побудова ММ на основі НМ проходила за стандартним алгоритмом і складалася з таких етапів: аналіз та підготовка вхідних даних, вибір типу та архітектури мережі, навчання моделі, тестування адекватності. Аналіз даних для НМ проводився з використанням методу головних компонент, оскільки його використання дозволяє вирішувати одразу декілька задач: виконується ортогоналізація векторів входу; виконується впорядкування векторів навчальної множини; видаляються вектори, діапазон значень яких незначний. Згідно з критеріями відбору значимих факторів, було вирішено залишити 6 факторів, які пояснюють 88 % дисперсії.

Порівняння особливостей різних видів НМ, а також аналіз робіт, в яких розв'язуються задачі прогнозування з використанням НМ дозволяє зробити висновок про доцільність застосування багатошарової мережі прямої передачі сигналу (персептрон). Враховуючи правила визначення кількості шарів та нейронів, вибір архітектури проводився за допомогою багаторазового експериментування з мережею. В результаті експериментів було встановлено, що оптимальним є два шари, що містять 5 і 1 нейрони відповідно. В якості функцій активації для шарів використовувались гіперболічний тангенс та лінійна функція, оскільки така комбінація має найкращі апроксимуючі властивості. Навчання мережі проводилося за методом зворотного розповсюдження помилки, за точність моделі прийнято середньоквадратичну та середню відносну похибку між реальним значенням міцності та значенням міцності НМ. Графік відповідності результатів для тестової вибірки показано на рисунку.



Графік експериментальних значень та значень нейромережі

Аналіз точності НМ моделі (середньоквадратична похибка $\sigma = 3,41$, середня відносна — 0,043) дозволяє зробити висновок про адекватність отриманої моделі та можливість її застосування для розв'язання задачі оптимізації.

Побудова регресійної моделі проводилася за методом найменших квадратів, в результаті чого отримано лінійну модель з такими характеристиками: $R^2 = 0,958$, $\sigma = 5,46$, що також дозволяє використовувати її для розв'язання задачі оптимізації.

Розробка ММ класифікації марки виробів

Для класифікації марки виробів було обрано логіко-ймовірнісну модель, оскільки її використання дозволяє не тільки визначити марку виробів, але й отримати ймовірність ризику, тобто розглядати управління тепловим об'єктом, як задачу прийняття рішень в умовах ризику.

Для опису об'єктів ризику використаємо логічні змінні, представлені в роботах [7]. Бінарна логічна змінна X_j , дорівнює 1 з ймовірністю P_j , якщо j -та ознака привела до неуспіху, і дорівнює 0 з ймовірністю $Q_j = 1 - P_j$ в протилежному випадку. Бінарна логічна змінна X_{jr} , що відповідає r -й градації j -ї ознаки, дорівнює 1 з ймовірністю P_{jr} і дорівнює 0 з ймовірністю $Q_{jr} = 1 - P_{jr}$. Тоді вектор $X(i) = (X_1, \dots, X_j, \dots, X_n)$ описує i -й об'єкт з таблиці «об'єктознаки».

Для розв'язання задачі класифікації на основі ЛП-моделі необхідно отримати ймовірнісний поліном ризику, який би визначав значення ймовірностей об'єктів P_i , та граничні значення допустимих ризиків P_{ad_i} , що розділяють об'єкти на класи.

За модель ризику приймемо модель типу «вузол», тоді ризик об'єкта P_i будемо обчислювати за формулою

$$P\{Y = 1\} = 1 - Q_1 Q_2 Q_3 \dots Q_n, \quad (7)$$

де $Q_j = 1 - P_{jr}$ — ймовірність того, що i -й фактор не вплинув на кінцевий результат.

Для використання формули (7), необхідно отримати ймовірності P_{jr} , які будемо оцінювати шляхом алгоритмічного навчання (ідентифікації) В-моделі ризику за даними таблиці «об'єкт-ознаки». Для ідентифікації В-моделі ризику використовувався алгоритм, описаний в роботі [7], що реалізує метод випадкового пошуку. Для коригування ймовірностей використовувалась така формула:

$$\begin{aligned} \text{Якщо } AP1_{jr} < AP1_{\min}, \text{ то } dP1_{jr} &= AP1_{\min}, \\ \text{Якщо } AP1_{jr} > AP1_{\min}, \text{ то } dP1_{jr} &= K1(N_{opt} - N_t) [(1-a) + aP1_{jr}] K_3, \end{aligned} \quad (8)$$

де a — коефіцієнт з інтервалу $\{0 < a < 1\}$; $AP1_{jr}$ — поточна амплітуда для градації; $AP1_{\min} = 0,0025$ — мінімальна амплітуда, при якій ще можлива оптимізація; K_1 — коефіцієнт швидкості ідентифікації; N_{opt}, N_t — задане максимально можливе і поточне число оптимізації цільової функції, K_3 — випадкове число, рівномірно розподілене в інтервалі $[-1, +1]$.

В результаті було отримано ймовірності для подій градацій, та значення ризику. Помилки або показники точності В-моделі ризику в класифікації об'єктів для кожного з класів E_i і в цілому \bar{E} розраховувались за формулами

$$E_i = (N_i - N_{is}) / N_i; \quad \bar{E} = (N - F) / N, \quad (9)$$

де N_i, N_{is} — відповідно кількість об'єктів даних класів, та кількість оцінок, що збігаються; F — загальне число коректно класифікованих об'єктів N .

Показники точності моделей складають $E_1 = 0,143, E_2 = 0,190, \bar{E} = 0,176$, що свідчить про адекватність розробленої моделі класифікації.

Враховуючи вигляд математичних моделей, задача оптимізації може бути розв'язана двома способами: при використанні регресійної математичної моделі — за допомогою методів умовної оптимізації, при використанні нейромережевої моделі — методом повного перебору.

Висновки

Таким чином, в роботі запропоновано математичну модель оптимізації температурної кривої процесу випалювання, яка дозволяє розраховувати значення температурного поля та параметри управління для отримання максимально можливої марки виробів при мінімальних витратах. Розроблено нейромережеву та регресійну модель ТП виготовлення цегли та модель класифікації марки виробів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Високотемпературные технологические процессы и установки / Под ред. Лисиенко В. Г. — Минск: Высшая школа, 1988. — 320 с.
2. Москвіна С. М., Ковалюк Д. О. Проблеми оптимізації управління технологічним процесом виготовлення цегли // Вісник ХНУ. — 2005. — № 5. — С. 121—125
3. Жученко А. І., Ярошук І. В. Оптиміальне керування процесом випалювання керамічної цегли // Автоматизація виробничих процесів. — 2002. — № 2(15). — С. 45—50.
4. Голінко І. М., Остапенко Ю. О. Моделювання динамічного режиму підзони випалювання // Автоматизація виробничих процесів. — 1999. — № 1/2. — С. 40—44.
5. Соболев О. С. О применении методов искусственного интеллекта в системах управления // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2003. — № 12. — С. 35—37
6. Dias F. M., Antunes A., Mota, A. M. Additive internal model control: an application with neural models in a kiln // IEEE. — 2002. — № 2. — P. 1612—1617.
7. Рыбаков А. В., Соложенцев Е. Д. Оптимизация в задачах идентификации логико-вероятностных моделей риска // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 7. — С. 51—63

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

Кафедра комп'ютерних систем управління, Вінницький національний технічний університет