

МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОПЕЧІ ЯК ОБ'ЄКТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Вступ

Біля третини всієї енергії, що використовується в світовій промисловості, витрачається на теплові процеси в нагрівальних установках. Звісно, як джерело, продовжує широко використовуватися енергія згорання рідкого, твердого і газоподібного палива.

З розвитком обчислювальної техніки математичне моделювання стало найефективнішим і економічним засобом дослідження функціональних можливостей і проектування електротехнічних пристроїв, таких зокрема, як регулятори параметрів систем автоматичного управління. Отже, метою даної роботи є розробка адекватної Simulink-моделі електропечі як об'єкту системи автоматичного управління.

З метою ефективного управління технологічними процесами нагрівання може використовуватися ЕОМ. Одним з найбільш перспективних методів є керування технологічним процесом на основі моделі, що вже застосовується в деяких електронних виробництвах. Позначену концепцію можна відносно просто розповсюдити на багато інших галузей і різновидів печей.

Параметрами таких систем є: маса тіла, що нагрівається, її зміна, початкова температура печі і зразка, просторові характеристики об'єктів. Складністю математичного аналізу даної системи є постійна динамічність її параметрів, істотна їх нелінійність. Управління технологічним процесом на основі моделі значно виграє за рахунок вдосконалення вимірювальної техніки і може розвиватися у напрямі розробки експертної системи, яка при необхідності має адаптаційні здібності. Це дозволяє зменшити виробничі ризики, пов'язані з перебудовою управління режимом роботи печі, оскільки система керування піччю віртуально володіє експертними знаннями, досвідом і здатністю адаптації або навчання.

Методи, засновані на моделюванні, у всіх випадках набагато перевершують ще пануючий ручний спосіб налагодження на багатьох печах: для управління режимом печі можна визначати спеціальні завдання – наприклад, можна скорочувати витрати енергії на виробництво продукції, збільшувати пропускну спроможність і розраховувати необхідне для цього оптимальне оснащення. Можливо також точніше регулювати температуру нагріву, ліквідувати або скорочувати прості і обмежувати пікові навантаження (для дотримання квот споживання електроенергії).

Методи та результати

Теорія теплообміну вивчає процеси розповсюдження теплоти в твердих, рідких і газоподібних тілах [1]. Перенесення теплоти може відбуватися трьома способами:

- 1) теплопровідністю;
- 2) конвекцією;
- 3) випромінюванням (радіацією).

Процес передачі теплоти теплопровідністю відбувається при безпосередньому контакті тіл або окремих частин тіла, що мають різні температури, і є молекулярним процесом передачі теплоти. Саме такий процес лежить в основі побудови Simulink-моделі електropечі.

Математичне описання процесу теплопровідності дає рівняння передачі тепла [1], або рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{k}{\rho c}\right)^2 \Delta T + \frac{q}{\rho c}, \quad (1)$$

де T – температура;

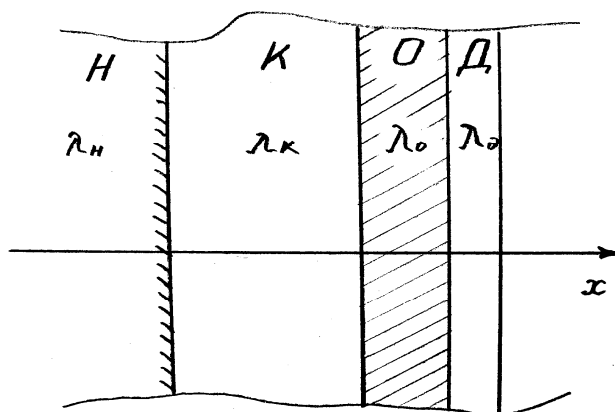
k – деяка позитивна скалярна величина, яка може залежати від властивостей середовища, температури, характеру зміни температури;

q – кількість тепла;

c – теплоємність речовини.

У разі, коли температура міняється не дуже сильно, в першому наближенні можна вважати k функцією тільки від точки середовища. Це припущення добре узгоджується з досвідом.

Рівняння (1) описує процеси теплопровідності в структурі на рисунку 1 [2].



H – нагрівач, випромінюючий певну потужність;

K – камера електropечі;

O – об'єкт нагрівання;

D – датчик для зняття температури об'єкту;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності кожного середовища.

Рисунок 1 – Одновимірна структура

Це – одновимірна структура, в якій легше за все використовувати опис процесу теплопровідності за допомогою системи лінійних диференціальних рівнянь першого порядку [3]. Таким чином, можна використати необхідний порівняно простий математичний апарат і забезпечити достатню точність при моделюванні.

Як відомо, диференціальні рівняння – звичайні і з частковими похідними, описують математичні моделі фізичних і технічних задач реальних процесів. Багато задач зводяться до розв'язку лінійних рівнянь з частковими похідними другого порядку. Прикладами таких рівнянь є класичні рівняння математичної фізики з невідомими функціями (наприклад, тиску, температури, електромагнітного потенціалу та інших фізичних величин), залежними від просторово-часових координат $x, y, z, t > 0$.

На підставі рівняння (1) складемо систему описуючих рівнянь.

За рисунком 1 представимо електропіч як трьохемнісну систему. Це означає, що до уваги приймаються процеси теплопередачі за рахунок теплопровідності між трьома середовищами: 1) K – камерою; 2) O – об'єктом; 3) D – датчиком.

Нагрівач H фактично встановлює температуру межі камери, енергія якої надалі передається об'єкту O . Датчик D призначений для фіксації температури об'єкту і розташовується на його поверхні. Таким чином, опишемо теплообмін між вище перерахованими середовищами за допомогою системи трьох диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} T_k \frac{dx_k}{dt} + x_k = x_c + \frac{P(t)}{\sigma_{k.c}}; \\ T_o \frac{dx_o}{dt} + x_o = \mu_k x_k + (1 - \mu_k) x_c; \\ T_d \frac{dx_d}{dt} + x_d = \eta_k x_k + (1 - \eta_k x_k) x_c, \end{cases} \quad (2)$$

де T_k – постійна часу камери;

T_o – постійна часу об'єкта;

T_d – постійна часу датчика;

$x_k = \theta_k(t) - \theta_3$;

$x_c = \theta_c(t) - \theta_3$;

$x_o = \theta_o(t) - \theta_3$;

$x_d = \theta_d(t) - \theta_3$;

θ_3 – задане значення температури термостатування;

$\theta_o(t)$ – миттєва температура об'єкта;

$\theta_k(t)$ – миттєва температура камери;

$\theta_d(t)$ – миттєва температура датчика;

$\sigma_{k.c}$ – коефіцієнт теплопровідності між камерою та оточуючим середовищем;

$P(t)$ – потужність поверхневого джерела нагріву;

$\mu_k = \sigma_{o.k} / (\sigma_{o.c} + \sigma_{o.k})$;

$$\eta_{\kappa} = \sigma_{\partial,c} / (\sigma_{\partial,c} + \sigma_{\partial,\kappa});$$

$\sigma_{o,\kappa}$ – коефіцієнт теплопровідності між об'єктом та камерою;

$\sigma_{\partial,\kappa}$ – коефіцієнт теплопровідності між датчиком та камерою;

$\sigma_{o,c}$ – коефіцієнт теплопровідності локальних теплових зв'язків між об'єктом та оточуючим середовищем;

$\sigma_{\partial,c}$ – коефіцієнт теплопровідності локальних теплових зв'язків між датчиком та оточуючим середовищем.

Дана система рівнянь записана не для абсолютних значень температури, а для значень різниці між температурою даного середовища і заданої температури термостатування. Це дає можливість спростити записану формулу, а також обчислити функції помилок.

Вищеперелічені коефіцієнти теплопровідності σ_i залежать від теплопровідності сусідніх середовищ і розраховуються за формулою:

$$\sigma_i = \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_{i2}}, \quad (3)$$

де λ_{i1} – теплопровідність середовища, що віддає тепло;

λ_{i2} – теплопровідність середовища, що приймає тепло.

При розгляді кожного рівняння системи (2) виводяться три відповідні передаточні функції каналів теплообміну:

$$x_{\kappa} = \frac{1}{T_{\kappa}p + 1} x_c + \frac{1}{\sigma_{\kappa,c} (T_{\kappa}p + 1)} P(t), \quad (4)$$

$$x_o = \frac{\mu_{\kappa}}{T_o p + 1} x_{\kappa} + \frac{1 - \mu_{\kappa}}{T_o p + 1} x_c, \quad (5)$$

$$x_{\partial} = \frac{\eta_{\kappa}}{T_{\partial} p + 1} x_{\kappa} + \frac{1 - \eta_{\kappa}}{T_{\partial} p + 1} x_c. \quad (6)$$

На підставі отриманих результатів (4) – (6) складемо повну структурну модель електропечі, яка зображена на рисунку 2. Отримана модель виявилася складною структурою, що містить декілька простих аперіодичних ланок, що описують окремо взятий процес теплопередачі. Детально опишемо отриману модель.

В електричному нагрівачеві H , рисунок 1, виділяється теплова потужність $P(t)$. Це приводить до зміни температури камери $x_{н,\kappa}$. За відсутністю впливу зовнішнього середовища на камеру, тобто теплоізоляції, що ідеалізується, $x_{н,\kappa} = x_{\kappa}$. Це і стане температурою камери електропечі.

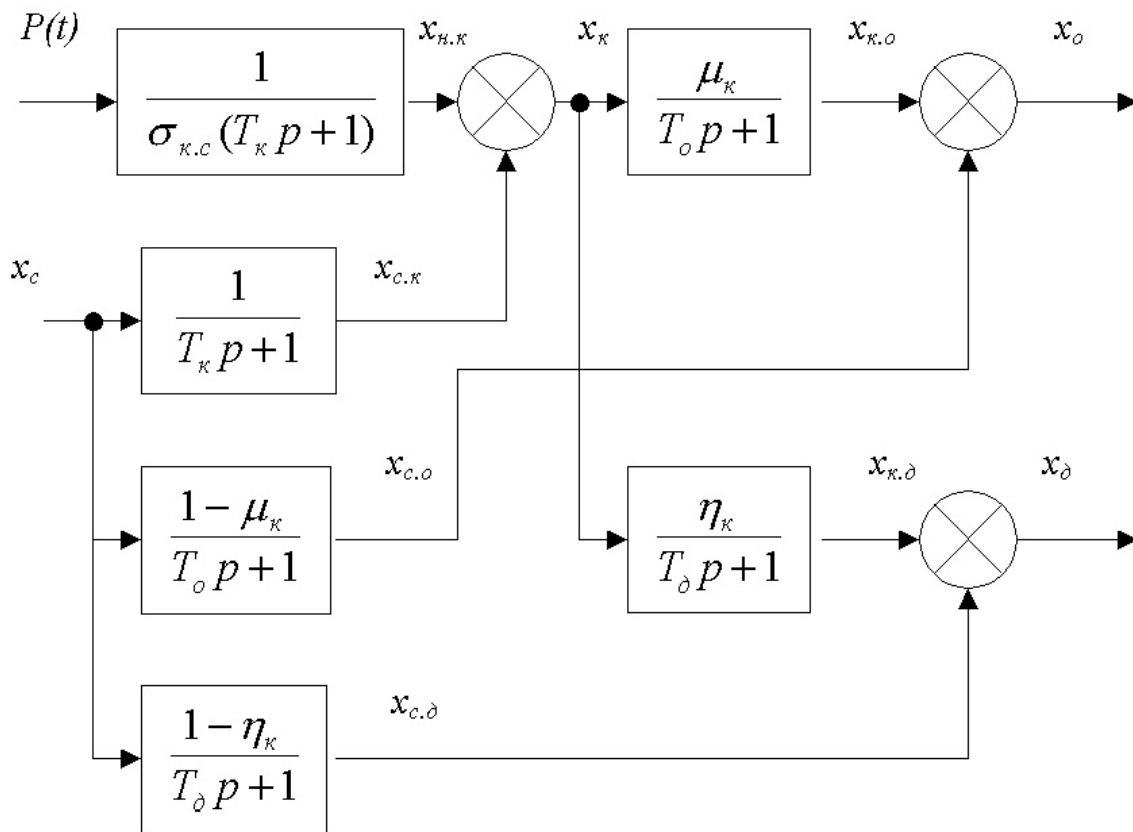


Рисунок 2 – Отримана структура електропечі

Вона, у свою чергу, вплине на температуру об'єкта нагрівання $x_{k,o}$. Ця температура також не враховує впливу зовнішнього середовища, тому при $x_c = 0$ маємо $x_{k,o} = x_o$.

З іншого боку, температура камери електропечі стане визначальною для температури $x_{k,d}$ датчика D , рисунок 1. При теплоізоляції, що ідеалізується, вплив зовнішнього середовища так само не враховується, тому $x_{k,d} = x_d$.

Тепер розглянемо вплив зовнішнього середовища. Його температура x_c так само є входним параметром для моделі, рисунок 2. Цей параметр посередньо аперіодичним ланкам додається до температур всіх середовищ: камери K , об'єкта O і датчика D , рисунок 1. Цей вплив пов'язаний з неідеальністю матеріалів теплоізоляції і істотно ускладнює отриману модель. Але його урахування дозволить суттєво уточнити результати моделювання.

В теплотехніці таке поняття, як «теплова постійна часу», істотно відрізняється від, на перший погляд, схожого поняття «електрична постійна часу» або «механічна постійна часу». Розглянемо ці відмінності. Згідно курсу загальної фізики, механічна постійна часу – це час, за який система зменшить свою енергію в e раз внаслідок втрат. На відміну від цього, теплова постійна часу визначається необхідною наперед встановленою точністю.

Для перевірки відповідності отриманої моделі реальним електропечам проведемо її детальний аналіз в поширеному пакеті MATLAB. Цей пакет використовує багатофункціональну мову програмування для технічних обчислень, у тому числі – і інженерно-електронних. Так само вона включає потужні засоби

математичних розрахунків, засоби візуалізації і програмування алгоритмів роботи структурних схем пристроїв.

В склад досліджуваної моделі, крім показаної на рисунку 2, входять дві підсистеми, що задають керуючі та збурюючі вхідні впливи.

Блок завдань керуючих впливів забезпечує моделювання всіляких вхідних управляючих дій. Тут передбачено три джерела вхідних дій, а саме:

- 1) одиничний стрибок (Step) – для моделювання процесів ручного вмикання і вимикання електропечі;
- 2) генератор широтно-імпульсного сигналу (Pulse generator) для моделювання електронних систем управління нагрівачем;
- 3) генератор сигналу довільної форми (Signal builder) для моделювання складних сигналів вхідної дії. Впливаючий сигнал створюється графічно.

Розглянемо реакцію моделі на одиничний стрибок вхідної напруги, що визначає потужність $P(t)$ в нульовий момент часу від 0В до 220В, рисунок 3.

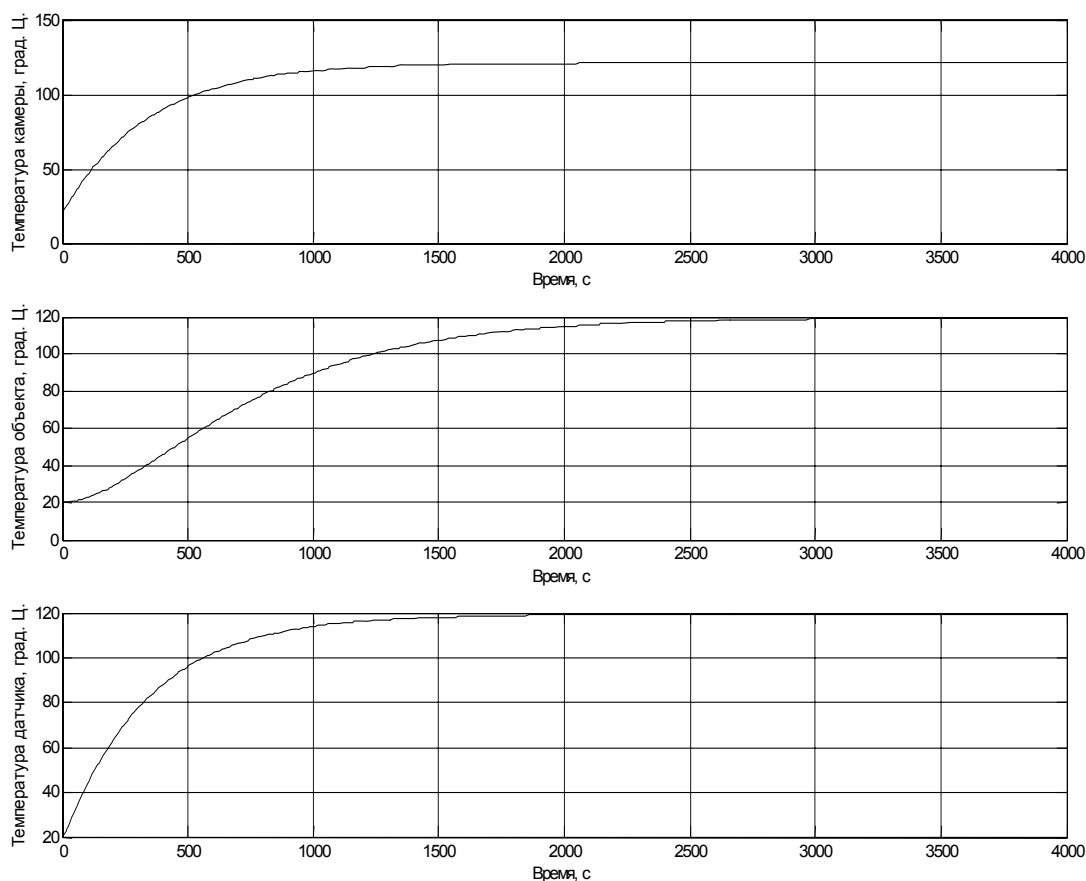


Рисунок 3 – Реакція системи на одиничний стрибок

Слід звернути увагу на те, що графіки мають по дві ділянки – ввігнутий і опуклий, що свідчить про те, що система аперіодична і має другий порядок.

Також було розглянуто реакцію моделі на дію модульованої широтно-імпульсної вхідної напруги. На основі кількох модельних експериментів вдалося встановити, що модель має порівняно лінійну регульовальну характеристику по

шпаруватості. Крім того, коливання температури камери і датчика при $T_{pwm} = 20\text{с}$ не перевищують 1-2 градуси, що визначає порівняно високу точність процесу управління.

Для підтвердження справедливості отриманої моделі були проведені декілька фізичних експериментів на реальній електропечі, результат одного з яких приведено на рисунку 4.

По отриманих результатах процесу нагрівання помітна невелика невідповідність теоретичних і практичних перехідних характеристик. Причиною запізнення може бути інерційність реального нагрівача, яка в даній моделі врахована не була, а крім того, ще і інші чинники, такі як особливості конструкції і неоптимальність параметрів теплоізоляції. Звідси випливає необхідність додання до Simulink-моделі печі ланки чистого запізнення з передаточною функцією виду e^{-pt} .

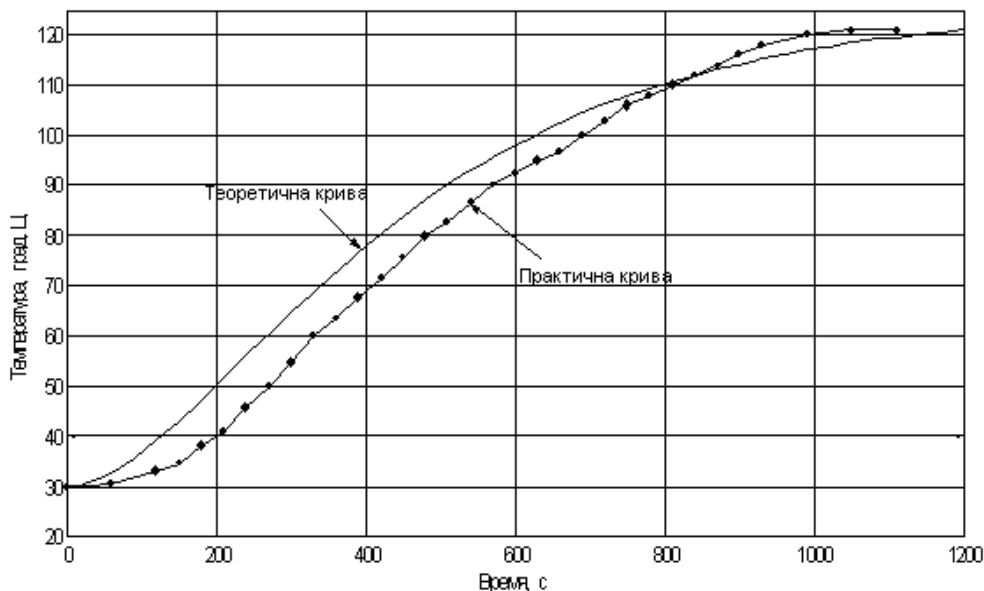


Рисунок 4 – Експериментальний дослід процесу нагрівання

Висновки

1. Для створення Simulink-моделі електропечі на підставі теорії теплопровідності було складено систему диференціальних рівнянь (2). Електропіч представлено трьохемнісною системою, де до уваги взяті процеси теплопередачі за рахунок теплопровідності між трьома середовищами: 1) K – камера; 2) O – об'єкт; 3) D – датчик. Така система повинна задовольнити вимогам простоти і високої точності при моделюванні.

2. Отримано передаточні функції каналів управління і каналів збурення, об'єднавши які вдалося скласти повну модель електропечі, рисунок 2. Для теоретичної перевірки вірності отриманої моделі було отримано і описано перехідний процес при вмиканні нагрівача, що має аперіодичний характер другого порядку; а також проаналізовано реакцію системи на широтно-імпульсну дію.

3. Встановлено, що у всіх випробуваннях температура об'єкта істотно запізнюється відносно температури камери і датчика. Це явище пов'язано з яскраво вираженою інерційністю об'єкта нагрівання.

4. Для перевірки адекватності отриманої моделі електропечі були проведені фізичні експерименти із застосуванням розробленого мікроконтролерного вимірювача температури. Порівняння отриманих практичних даних з раніше приведеними теоретичними показало, що розроблена модель достатньо точно відображає характер теплових процесів у реальному об'єкті. Причиною розбіжностей є, насамперед, інерційність реального нагрівача, яку не було враховано в даній моделі, а також особливості конструкції, непостійність параметрів теплоізоляції і зростання частки енергії, що передається в процесах конвекції.

5. Отримана модель відкриває можливості експериментальної ідентифікації об'єкта з подальшим з'ясуванням його характеристик та конкретних параметрів моделі. Застосування запропонованої моделі та електронно-обчислювальної машини дозволяє суттєво скоротити час розробки системи керування та споживання електроенергії порівняно з реальною установкою. Під час симуляції існує можливість міняти в широких межах будь-які параметри моделі і симулятора, застосовуючи різноманітні регулятори.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Куталадзе С.С.* Основы теории теплообмена. - Изд. 5-е перераб. и доп. - М.: Атомиздат, 1979, 416с.
2. *Льков А.В.* Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967, 600с.
3. *Мартыненко В.С.* Операционное исчисление: Учеб. пособие. - 4-е изд. перераб. и доп. - К.: Высшая шк., 1990. - 359с.: ил.