

**О.А. Жученко, к.т.н., доц
М.Г. Хібеба, аспірант**

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

Модель термічної обробки вуглецевої сировини в електрокальцинаторі

Висока якість системи керування процесом термічної обробки вуглецевої сировини дозволяє зменшити вихід бракованої продукції на наступних етапах виробництва вуглецевих виробів та підвищити якість готової продукції. Синтез таких систем можливий лише за умови докладного дослідження процесів, що протікають на даному етапі виробництва. Враховуючи, що проведення досліджень на реальних об'єктах практично неможливе, єдиною альтернативою залишається метод математичного моделювання. Враховуючи значний час розрахунку повної математичної моделі процесу з'являється необхідність у пошуку і реалізації методів її спрощення.

У цьому дослідженні на основі аналізу існуючих методів спрощення математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами обґрунтовано вибір методу Фур'є для спрощення математичної моделі процесу термічної обробки вуглецевої сировини в електрокальцинаторі. Розроблено спрощену математичну модель вказаного процесу. Визначено оптимальні структури спрощених математичних моделей. Проведено їх параметричну ідентифікацію. Досліджена відповідність результатів розрахунків за спрощеною та початковою математичними моделями. В результаті отримано модель, що досить точно відображає температурні поля, отримані за допомогою повної моделі та має досить незначний час розрахунку (декілька секунд).

У подальших дослідженнях планується провести перевірку на адекватність отриманої моделі експериментальним даним. Після цього модель може бути використана як для подальшого дослідження температурних полів робочої зони електрокальцинатора в процесі термічної обробки вуглецевої сировини, так і для синтезу системи керування цим процесом у реальному часі.

Ключові слова: *виробництво вуглецевих виробів; електрокальцинатор; математична модель; метод Фур'є; структурна та параметрична ідентифікація.*

Постановка проблеми. На сьогоднішній день виробництво вуглецевих виробів є надзвичайно важливим, оскільки продукція цього виробництва застосовується в різних галузях промисловості: чорній та кольоровій металургії, машинобудуванні, хімічній промисловості та інших.

Постійне вдосконалення технологій виплавки чавуну, сталі, феросплавів, кольорових металів і сплавів обумовлює необхідність подальшого розвитку виробництва, підвищення якості і конкурентоспроможності вуглеграфітових виробів [1]. Як наслідок підвищуються вимоги, що ставляться до матеріалів з яких виготовляються ці вироби. Одним з визначальних технологічних процесів виробництва вуглецевої продукції є термічна обробка вуглецевої сировини в електричній печі шахтного типу (електрокальцинаторі), під час якої формуються властивості вуглецевої сировини, що впливають як на перебіг наступних технологічних процесів виробництва, так і, зрештою, на якість готової продукції [2, 3].

Синтез системи керування процесом термічної обробки сировини в електрокальцинаторі, яка забезпечувала б оптимальні режими його функціонування, неможливий без попереднього дослідження самого процесу. Дослідження на реальних об'єктах в умовах діючого виробництва досить затратне та може призвести до виходу з ладу технологічного обладнання, що фактично робить неможливим проведення промислового експерименту. Єдиною альтернативою в такій ситуації виступає метод математичного моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Математичному моделюванню процесу термічної обробки вуглецевої сировини присвячена значна кількість наукових праць [2, 4–13]. При моделюванні термічної обробки вуглецевої сировини неможливо нехтувати розподілом параметрів та нелінійною природою процесів, оскільки це особливості спричиняють ряд проблем, які понижують якість обробки та здебільшого і є об'єктом досліджень. Тому у зазначених вище роботах, як правило, математична модель являє собою систему нелінійних нестационарних рівнянь у частинних похідних.

Час розрахунку такої моделі на сучасному стаціонарному комп'ютері складає декілька годин. Така тривалість розрахунку, по-перше, суттєво ускладнює безпосередньо дослідження процесу і, по-друге, робить неможливим використання такої моделі у системах керування реальним часом. Названі обставини висувають нагальну задачу спрощення початкової складної моделі.

На сьогоднішній день існує значна кількість підходів до спрощення моделей, з яких найчастіше використовується метод лінеаризації нелінійних диференціальних рівнянь, методи ідентифікації, метод Фур'є.

Метод лінеаризації передбачає зведення нелінійних диференціальних рівнянь до їх лінійного наближення [14]. Розв'язок системи лінійних диференціальних рівнянь – задача простіша, ніж розв'язок системи нелінійних диференціальних рівнянь, і розрахунок моделі, представленої у такому вигляді, займає набагато менше часу. Недоліками цього методу є те, що далеко не всі нелінійні диференціальні рівняння піддаються лінеаризації, а процеси, що мають явно виражений нелінійний характер, можуть недостатньо точно описуватися такими моделями.

Методи ідентифікації дозволяють за отриманими зі складної моделі даними розрахувати коефіцієнти спрощеної моделі. Складнощі у застосуванні таких методів полягають у необхідності підбирати структуру моделі. Недолік таких методів полягає у тому, що навіть при підбраній оптимальній структурі моделі зі збільшенням числа вихідних сигналів точність моделі значно зменшується [15].

Метод Фур'є передбачає представлення вихідних сигналів у вигляді ряду, що складається з суми добутків коефіцієнтів, які відображають зміну вихідних сигналів у часі, та коефіцієнтів, що відображають розподілення вихідних сигналів у просторі [16]. У таких моделях залежність вихідних сигналів від вхідних визначається ідентифікацією залежності значень коефіцієнтів, що відображають зміну вихідних сигналів у часі, від вхідних сигналів.

Постановка завдання дослідження. Наведений вище короткий аналіз існуючих методів спрощення математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами свідчить про те, що моделі, отримані за методом Фур'є, не мають недоліків моделей, створених за допомогою методів ідентифікації, адже кількість членів ряду, що потрібні для точного відображення вихідних сигналів (а отже і кількість коефіцієнтів, що відображають зміну вихідних сигналів у часі) менша за кількість вихідних сигналів.

У зв'язку з цим як метод спрощення початкової складної математичної моделі процесу термічної обробки вуглецевої сировини доцільно вибрати метод розділення змінних Фур'є.

Таким чином, завданням цього дослідження є на основі методу Фур'є створити спрощену математичну модель процесу термічної обробки вуглецевої сировини в електрокальцинаторі, яка потребує короткого часу розрахунку та з достатньою точністю відтворює результати розрахунків за початковою складною моделлю.

Для того, щоб реалізувати метод Фур'є, необхідно отримати температурні «знімки», тобто температурні поля об'єкта за випадкових вхідних сигналів. Для отримання таких полів була використана початкова модель [6].

Апроксимація температурних знімків

Алгоритм формування спрощеної моделі містить такі кроки [16]:

- за отриманими раніше температурними знінками T_{snap} визначити матрицю $R' = T_{snap}^T T_{snap}$;

- визначити власні значення $\Lambda_{R'}$ та власні вектори Ψ матриці R' ;

- обчислити значення базисних векторів $\varphi_i = T_{snap} \psi_i (\lambda_i)^{-1/2}$;

- після визначення базисних векторів обчислити коефіцієнти Фур'є за формулою:

$$A_{snap} = [\tilde{a}_n(1) \quad \tilde{a}_n(2) \quad \dots \quad \tilde{a}_n(K)] = \Phi_K^T T_{snap} \quad (1)$$

- обрати структуру моделі залежності між вхідним сигналом $u(t)$ та коефіцієнтами Фур'є $a_n(t)$ і на основі даних $\tilde{u}_n(t)$ та $\tilde{a}_n(t)$ провести параметричну ідентифікацію;

- отримавши модель залежності $a_n(t)$ від $u(t)$, змоделювати зміну у часі коефіцієнтів Фур'є за будь-якої потрібної траєкторії вхідного сигналу;

- за формулою $T(t) = \Phi a(k)$ знаходимо зміну температурного поля у часі для заданої траєкторії вхідного сигналу.

Зазначений алгоритм необхідно реалізувати для різної кількості коефіцієнтів Фур'є n . У результаті має бути отримана серія моделей для різних n , серед яких потрібно визначити таку, що найкраще відображає температурні поля об'єкта.

Матриці температурних знімків для створення спрощених моделей температурної обробки вуглецевої сировини було взято з досліджень, оснований на початковій моделі [5]. В результаті розкладу за сингулярними числами були отримані значення базис-векторів φ_i . Далі за допомогою формули (1) визначені значення коефіцієнтів Фур'є. Результати розрахунків не наведені тому, що L (кількість точок (вузлів), в яких моделюється температура) складає сотні тисяч, а кількість кроків по часу K – сотні. Враховуючи, що Φ – має розмірність $L \times K$ та A – $K \times K$ повне виведення цих матриць виявляється неможливим.

Для оцінки якості апроксимації було обраховано похибку (2) для випадків використання $n = 1..20$ перших базис-векторів.

$$\varepsilon_A = \frac{\sum_{\xi=1}^L \sum_{t=0}^K (T_{snap}(\xi, t) - T_A(\xi, t))^2}{KL}, \quad (2)$$

де $T_A = \Phi_n A_n$ – матриця $L \times K$ апроксимованих температур, Φ_n, A_n – перші n базис-векторів та коефіцієнтів Фур'є відповідно. Для заданої максимально допустимої похибки $\varepsilon_{\max} = 5$ використання у подальших дослідженнях більш, ніж 10 базис-векторів виявилось недоцільним, оскільки така кількість вже забезпечила умову $\varepsilon_A < \varepsilon_{\max}$ (рис. 1). Приймаємо $n_{\max} = 10$.

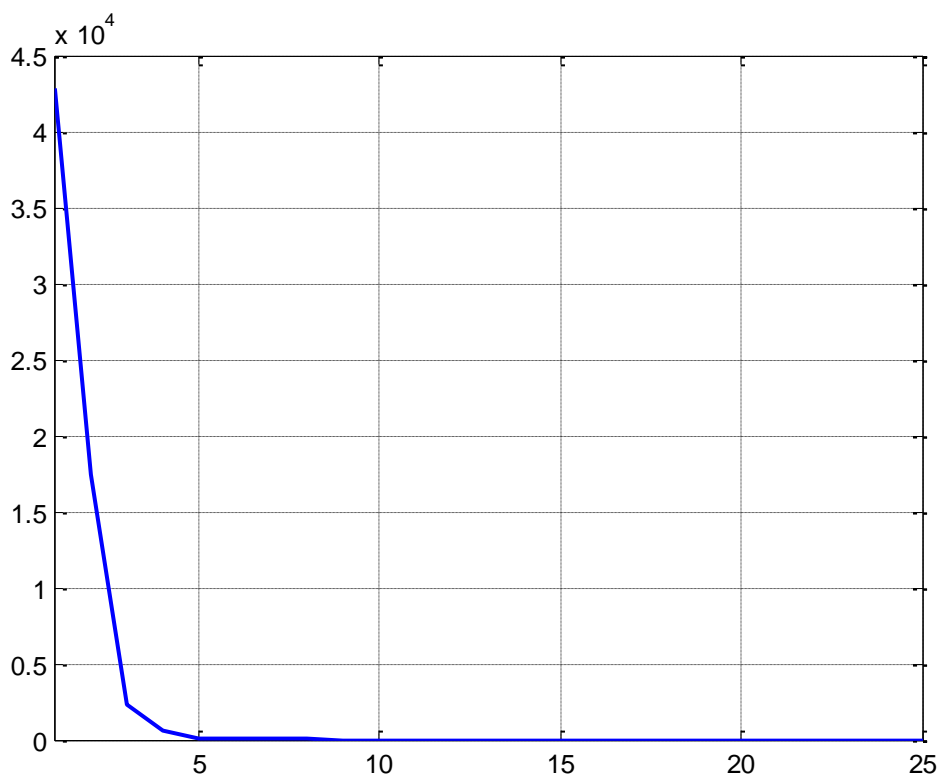


Рис. 1. Залежність похибки апроксимації від кількості членів ряду

Ідентифікація залежностей між отриманими значеннями коефіцієнтів Фур'є та вхідними сигналами

Для ідентифікації залежностей було використано пакет *System Identification Toolbox*, що входить до складу *Matlab* [17].

Задля автоматизації процесу пошуку оптимальної структури моделі було розроблено функції, що використовують функції з пакета *System Identification Toolbox*. У результаті ідентифікації для кожного з $n = 1..n_{\max}$ було знайдено такі моделі, що найточніше описують зв'язок між значеннями коефіцієнтів $\alpha_i(t)$ та вхідними сигналами моделі $u(t)$. У більшості випадків найкраще з поставленою задачею впоралися ARX-моделі авторегресії зі структурою типу:

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-nk) + \dots + b_{nb} u(t-nb-nk+1) + e(t)$$

Лише для $n = 8$ найкраще впоралася модель у просторі станів.

У таблиці 1 містяться дані про конфігурацію оптимальних ідентифікаційних для кожного з n та їх точність [17].

Зменшення точності ідентифікаційних моделей зі збільшенням n пояснюється збільшенням кількості виходів моделі і, як наслідок, ускладненням характеру зв'язків між входами і виходами. При цьому при $n = 4..7$ точність моделей збільшується за рахунок ускладнення структури регресійної моделі.

Дані про оптимальні структури ідентифікаційних моделей

n	na	nb	nk	Точність моделі, %
1	1	4	1	89,91
2	1	4	1	84,81
3	1	4	4	75,87
4	2	4	1	55,51
5	4	2	2	56,15
6	2	4	1	64,08
7	2	4	1	64,87
8	1	-	-	54,32
9	3	2	1	43,60
10	3	2	1	40,71

Дослідження якості роботи спрощених моделей.

Для отримання спрощених моделей матрицю, що складається з n базис-векторів необхідно помножити на вектори вихідних сигналів ідентифікаційних моделей (значення коефіцієнтів $\alpha_i(t)$ в момент часу t). Оскільки в результаті моделювання отримано динаміку температури в усьому об'ємі електрокальцинатора, то для графічного представлення результатів доцільно зображувати температури лише в деяких контрольних точках. Для графічного відображення результатів було обрано точки (рис. 2), що відображують динаміку температур в II зоні електрокальцинатора. Результати роботи спрощених моделей наведено на рисунку 3–8.

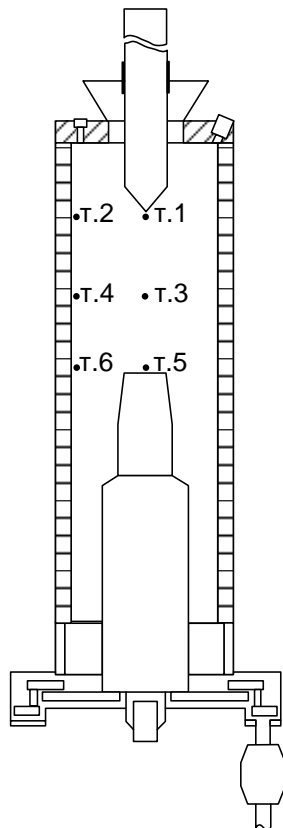


Рис. 2. Розташування контрольних точок

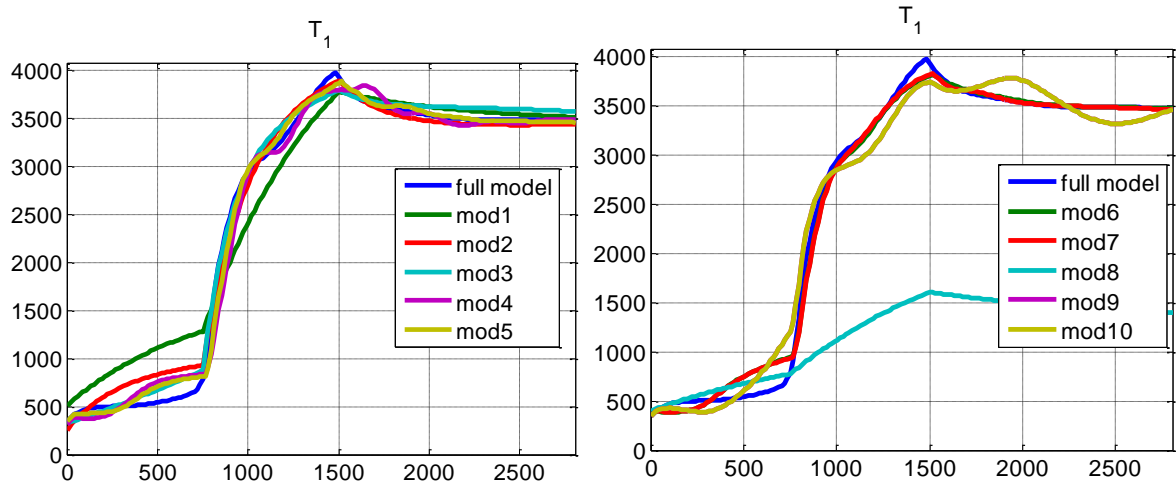


Рис. 3. Значення T_1 , отримані з повної моделі та спрощених моделей (full model – повна модель, mod1..10 – модель, що використовує 1..10 коефіцієнтів Фур'є)

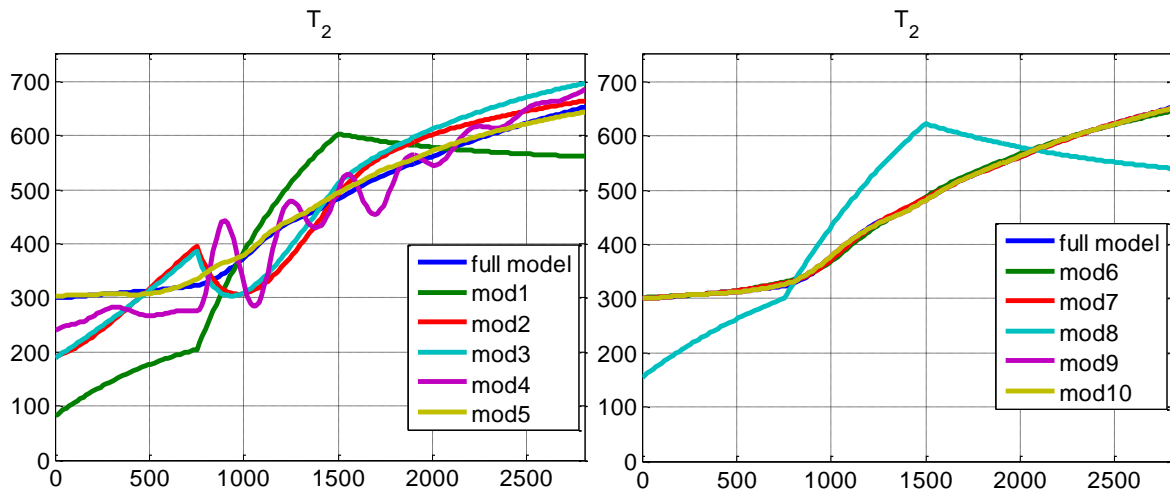


Рис. 4. Значення T_2 отримані з повної моделі та спрощених моделей (full model – повна модель, mod1..10 – модель, що використовує 1..10 коефіцієнтів Фур'є)

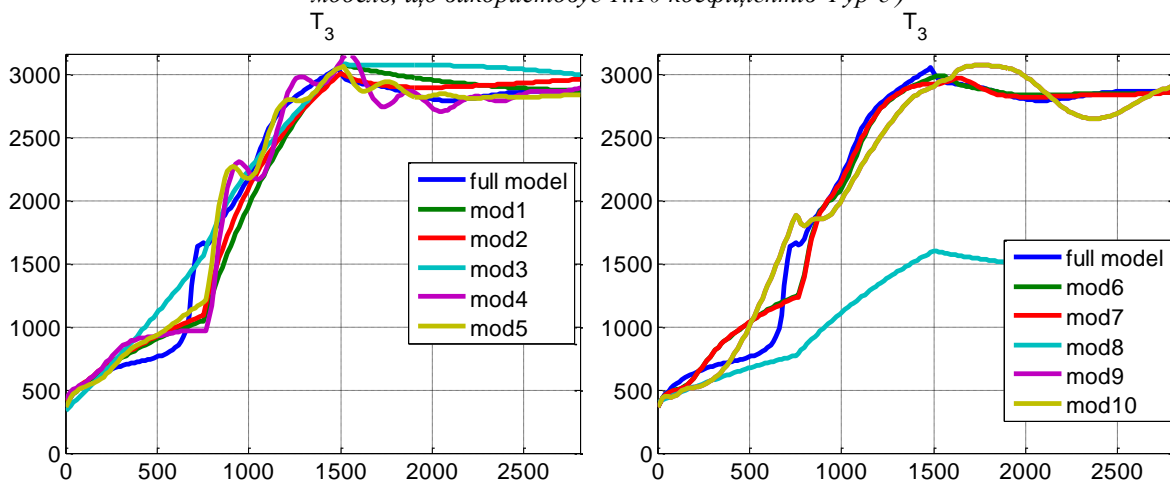


Рис. 5. Значення T_3 , отримані з повної моделі та спрощених моделей (full model – повна модель, mod1..10 – модель, що використовує 1..10 коефіцієнтів Фур'є)

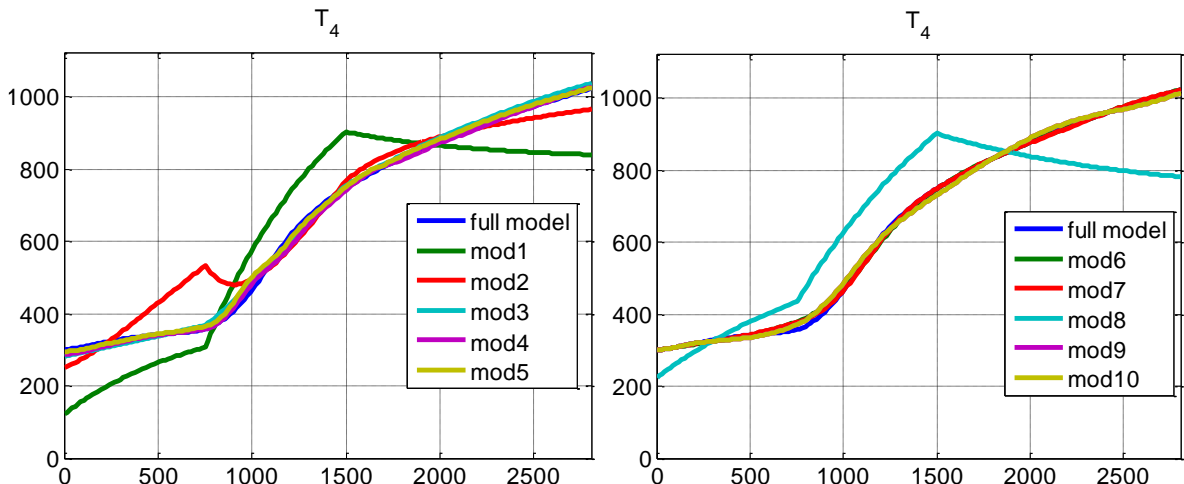


Рис. 6. Значення T_4 , отримані з повної моделі та спрощених моделей (full model – повна модель, mod1..10 – модель, що використовує 1..10 коефіцієнтів Фур'є)

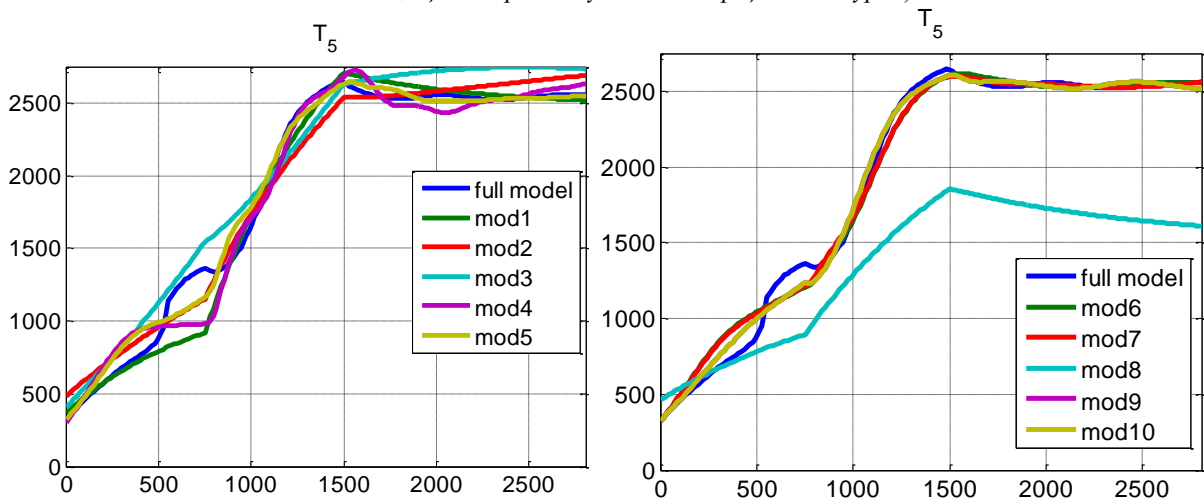


Рис. 7. Значення T_5 , отримані з повної моделі та спрощених моделей (full model – повна модель, mod1..10 – модель, що використовує 1..10 коефіцієнтів Фур'є)

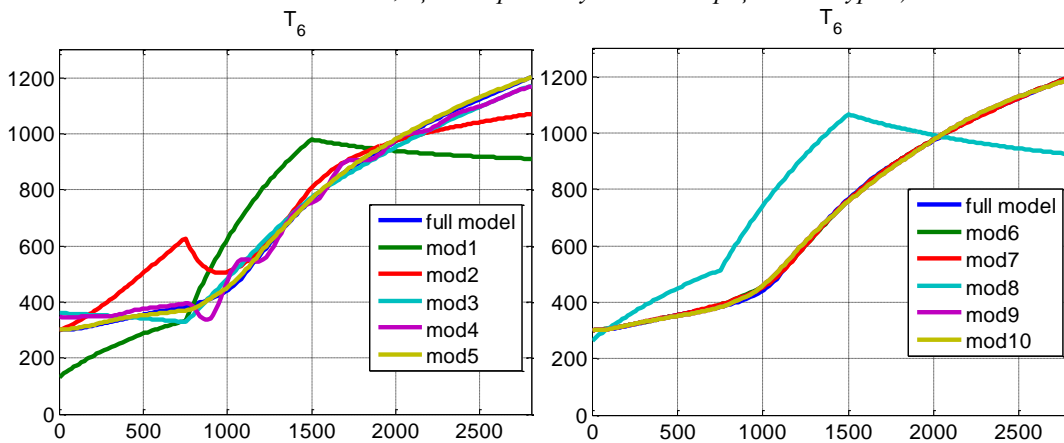


Рис. 8. Значення T_6 , отримані з повної моделі та спрощених моделей (full model – повна модель, mod1..10 – модель, що використовує 1..10 коефіцієнтів Фур'є)

Похибки роботи отриманих моделей обраховувалися за допомогою формули (2), в якій T_A замінено на T_M – матрицю змодельованих спрощеними моделями температур.

Модель з $n = 1$ очікувано показала найгірші результати, відтворивши температури в середньому з похибкою у $50,43$ °C, що спричинено низькою якістю апроксимації температурних знімків лише одним базис-вектором (рис. 1). Далі точність значно зростає для моделей з n від 2 до 6 (табл. 2., рис. 4 – 8), після чого зі збільшенням n похибка відтворення температурних знімків починає зростати. Така динаміка зміни похибки пояснюється виконанням умови:

$$\|a_1\|_2^2 \geq \|a_2\|_2^2 \geq \dots \geq \|a_N\|_2^2, \quad (3)$$

та збільшенням складності ідентифікаційних моделей, що негативно впливає на їх точність (табл. 1). Враховуючи те, що кожен наступний член ряду вносить все менше «енергії» та те, що збільшення кількості виходів в ідентифікаційній моделі спричинює зменшення її точності варто очікувати, що подальше збільшення n призведе до значного збільшення похибки спрощеної моделі, що ще раз доводить доцільність вибору $n_{max} = 10$.

Таблиця 2

Похибки відтворення температурних знімків

n	1	2	3	4	5	6
Похибка	2543,91	874,52	485,71	552,23	344,46	203,34
n	7	8	9	10		
Похибка	205,32	2467,43	747,88	749,28		

Отже, в результаті дослідження якості роботи спрощених моделей було виявлено, що найбільш точною є спрощена модель, яка використовує шість перших базис-векторів ($n = 10$). Дана модель має досить низьку середню похибку відтворення температурних знімків 14,26 °C та може бути використана в подальших дослідженнях.

Висновки. Створення сучасної системи керування процесом термічної обробки вуглецевої сировини в електрокальцинаторі пов'язане з використанням математичної моделі процесу як на етапі попередніх досліджень, так і безпосередньо у системі керування реального часу.

Проведений аналіз існуючих математичних моделей свідчить про неефективність останніх на етапі попередніх досліджень та неможливість їх використання у системах керування реального часу. Ці обставини спричинили потребу у розробленні спрощеної математичної моделі процесу температурної обробки.

Виконане дослідження відомих методів спрощення математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами дало можливість обґрунтовано вибрати метод розділення змінних Фур'є для спрощення початкової складної математичної моделі процесу.

Розроблено спрощену математичну модель для процесу термічної обробки вуглецевої сировини в електрокальцинаторі. Визначено оптимальні структури моделей та проведено їх параметричну ідентифікацію.

Проведене дослідження відповідності результатів розрахунків за спрощеною математичною моделлю результатам, що отримані з початкової складної моделі, продемонструвало високу ефективність запропонованих спрощених моделей.

У подальших дослідженнях розроблені спрощені математичні моделі можуть бути використані для синтезу системи керування процесом термічної обробки вуглецевої сировини в електрокальцинаторі.

Список використаної літератури:

1. Гасик М.И. Управление процессом прокаливания антрацита по измеряемой величине падения напряжения в антрацитовой загрузке электрокальцинатора / М.И. Гасик, Е.И. Цыбуля, А.В. Безуглый // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – № 5. – С. 31–35.
2. Санников А.К. Производство электродной продукции / А.К. Санников, А.Б. Сомов, В.В. Ключников. – М. : *Металлургия*, 1985. – 129 с.
3. Чалых А.Ф. Графитация углеродистых материалов / А.Ф. Чалых, В.П. Соседов. – М. : *Металлургия*, 1987. – 176 с.
4. Лазарев Т.В. Закономерности процессу высокотемпературного оброблення рухомого шару сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах – електрокальцинаторах : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології» / Т.В. Лазарев. – Київ, 2015. – 22 с.
5. Карвацкий А.Я. Теоретические и экспериментальные исследования теплоэлектрического и механического состояния высокотемпературных агрегатов / А.Я. Карвацкий, Е.Н. Панов, С.В. Курузов. – К. : НТУУ «КПИ», 2012. – 356 с.
6. Моделирование процессу графітування нафтового коксу в шахтній електропечі неперервної дії / Є.М. Панов, А.Я. Карвацький, С.В. Курузов, С.В. Лелека, П.В. Степура // *Вісник НТУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. – 2011. – № 1 (7).
7. Шулепов С.В. Физика углеродистых материалов / С.В. Шулепов. – М. : *Металлургия*, 1972. – 256 с.
8. Исследование электрического контактного сопротивления графита с медью и терморасширенным графитом / А.Я. Карвацкий, С.В. Лелека, И.В. Пулинец, Т.В. Лазарев и др. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – № 5 (5). – С. 45–49.
9. Цыбуля Е.И. Анализ влияния физико-химических процессов на технологию производства термоантрацита в электрокальцинаторах / Е.И. Цыбуля, М.И. Гасик, А.Г. Гриншпунт // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 2. – С. 19–23.
10. Печи для производства высокоочищенных углеродных материалов / М.В. Губинский, С.С. Федоров, Н.В. Ливитан, И.В. Барсуков и др. // *Теория и практика тепловых процессов в металлургии*. – 2012.

11. Анализ энергетической эффективности печей для высокотемпературной термической обработки углеродных материалов / М.В. Губинский, С.С. Федоров, Н.В. Ливитан, А.Г. Гогоци и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 2.
12. Современное состояние проблемы получения графитированного наполнителя электродных изделий в электрокальцинаторах / А.А. Матвиенко, А.Я. Карвацкий, С.В. Лелека, М.Е. Титов и др. // *Вісник НТУ «КПІ»*. Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. – № 1 (7).
13. Дикарева А.В. Математическая модель тепловой работы электрокальцинатора / А.В. Дикарева, Т.Е. Герасименко, Е.И. Мешков // *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве*. – Екатеринбург : УрФУ, 2012. – С. 43–46.
14. Юревич Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юревич. – Петербург : БХВ-Петербург, 2016. – 560 с.
15. Гончаров В.И. Идентификация объектов управления с распределёнными параметрами / В.И. Гончаров, Нгуен Куанг Зунг, Тхан Вьет Зунг // *GISAP: Technical Sciences, Construction and Architecture*. – 2016. – № 8. – С. 8–11.
16. Жученко О.А. Метод спрощення математичних моделей об'єктів керування із розподіленими параметрами / О.А. Жученко, В.С. Цапар // *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. – 2015. № 1. С. 15–25.
17. Дьяконов В.П. Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании / В.П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 576с.

References:

1. Gasik, M.I., Cybulja, E.I. and Bezuglyj, A.V. (2009), «Upravlenie processom prokalinanija antracita po izmerjaemoj velichine padenija naprjazhenija v antracitovoj zagruzke jelektrokal'cinatora», *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*, Vol. 5, pp. 31–35.
2. Sannikov, A.K., Somov, A.B. and Kliuchnikov, V.V. (1985), *Proizvodstvo elektrodnoi produktsii*, Metallurgija Publ., Moscow, 129 p.
3. Chalyh, A.F. and Sosedov, V.P. (1987), *Grafitacija uglepodistyh materialov*, Metallurgija Publ., Moscow, 176 p.
4. Lazarev, T.V. (2015), «Zakonomirnosti procesu visokotemperaturnogo obroblennja ruhomogo sharu sipuchih vuglecevih materialiv v elektrichnih pechah – elektrokal'cinatorah», Abstract of kand. tehn. nauk, spec. 05.17.08, Procesi ta obladnannja himichnoi tehnologii, Kiiiv, 22 p.
5. Karvackij, A.Ja., Panov, E.N. and Kutuzov, S.V. (2012), *Teoreticheskie i jeksperimental'nye issledovanija teplojelektricheskogo i mehanicheskogo sostojanija vysokotemperaturnyh agregatov*, NTUU «KPI», K., 356 p.
6. Panov, Je.M., Karvac'kyj, A.Ja., Kutuzov, S.V., Leleka, S.V. and other (2011), «Modeljuvannja procesu grafituvannja naftovogo koksu v shahtnij elektropechi nepererвної dii'», *Visnik NTU «KPI», Himichna inzhenerija, ekologija ta resursozbezehennja*, Vol. 1.
7. Shulepov, S.V. (1972), *Fizika uglegrafitovykh materialov*, Metallurgija, Moscow, 256 p.
8. Karvatskii, A.Ia., Leleka, S.V., Pulinet, I.V., Lazarev, T.V. and other (2014), «Issledovanie elektricheskogo kontaktного soprotivleniia grafita s med'iu i termorasshirenym grafitom», *Vostochno-Evropeskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, Vol. 5, pp. 45–49.
9. Tsybulia, E.I., Gasik, M.I. and Grinshpunt, A.G. (2013), «Analiz vliianiia fiziko-khimicheskikh protsessov na tekhnologiiu proizvodstva termoantratsita v elektrokal'tsinatorakh», *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*, Vol. 2, pp. 19–23.
10. Gubinskii, M.V., Fedorov, S.S., Livitan, N.V., Barsukov, I.V. and other (2012), «Pechi dlja proizvodstva vysokochistykh uglerodnih materialov», *Teorija i praktika teplovyh processov v metallurgii*.
11. Gubinskii, M.V., Fedorov, S.S., Livitan, N.V. and Gogotsi, A.G. (2013), «Analiz energeticheskoi effektivnosti pechei dlja vysokotemperaturnoi termicheskoi obrabotki uglerodnih materialov», *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*, Vol. 2.
12. Matvienko, A.A., Karvackij, A.Ja., Leleka, S.V., Titov, M.E. and other (2011), «Sovremennoe sostojanie problemy poluchenija grafitirovannogo napolnitelja jelektrodnyh izdelij v jelektrokal'cinatorah», *Visnik NTU «KPI», Himichna inzhenerija, ekologija ta resursozbezehennja*, No 1 (7).
13. Dikareva, A.V., Gerasimenko, T.E. and Meshkov E.I. (2012), «Matematicheskaja model' teplovoj raboty jelektrokal'cinatora», *Teploehnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve*, UrFU, Ekaterinburg, pp. 43–46.
14. Jurevich, E.I. (2016), *Teorija avtomaticheskogo upravlenija*, BHV-Peterburg, Peterburg, 560 p.
15. Goncharov, V.I., Nguen, Kuang Zung and Tkhan, V'et Zung (2016), «Identifikacija ob'ektov upravlenija s raspredeljonnyimi parametrami», *GISAP: Technical Sciences, Construction and Architecture*, Vol. 8, pp. 8–11.
16. Zhuchenko, O.A. and Capar, V.S. (2015), «Metod sproshhennja matematychnyh modelej ob'ektiv keruvannja iz rozpodilennyh parametramy», *Avtomatyzacija tekhnologichnyh i biznes-processiv*, Vol. 1, pp. 15–25.
17. D'iakonov, V.P. (2005), *Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 v matematike i modelirovanii*, SOLON-Press Publ., Moscow, 576 p.

Жученко Олексій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації хімічних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Наукові інтереси:

– адаптивні системи керування; – математичне моделювання.

Хібеба Микола Григорович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Наукові інтереси:

– оптимальні системи керування; – математичне моделювання.

Стаття надійшла до редакції 13.03.2019.