

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ОПЕРАТИВНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ОБКОТИШІВ НА КОНВЕЄРНИХ ВИПАЛЮВАЛЬНИХ МАШИНАХ

Технологічний процес термічної обробки обкотишів на конвеєрній випалювальній машині, як об'єкт автоматизації, характеризується багатомірністю, нелінійністю, наявністю значних запізнь у каналах керування, неможливістю безперервного контролю окремих технологічних показників, впливом неконтрольованих збурень. Як показали попередні дослідження [1], завдання підвищення ефективності автоматизованого керування процесом випалювання обкотишів може бути вирішене за рахунок розробки системи, в якій періодично здійснюється ідентифікація моделей процесів термічної обробки обкотишів у технологічних зонах машини й отримані моделі використовуються для оптимізації процесу в режимі реального часу на основі методів MPC-керування, тобто керування з прогнозуючими моделями (англ. *Model Predictive Control*, MPC).

У базовому варіанті методу керування з прогнозуючою моделлю використовуються лінійні моделі об'єкта керування, що позбавляє необхідності вирішувати завдання квадратичного програмування в режимі реального часу та дозволяє аналітичним шляхом здійснювати пошук оптимального керування [2, 3]. Але, за свідченнями авторів, для суттєво нелінійних процесів та в умовах дії інтенсивних збурень ефективність алгоритмів MPC-керування з використанням лінійних моделей виявляється недостатньою [4]. Тому в останні роки відбувається активний розвиток методів керування на основі прогнозуючих нелінійних моделей (Nonlinear Model Predictive Control, NMPC), і, як наслідок, з'явилося багато друкованих робіт, присвячених їх використанню для автоматизації технологічних процесів збагачувальних виробництв [4–6]. З урахуванням того, що для більшості процесів досить складно отримати адекватну аналітичну модель, перевага надається використанню в схемах NMPC-керування нелінійних емпіричних моделей, які отримуються в процесі оперативної ідентифікації на основі результатів вимірювання вхідних та вихідних величин об'єкта керування [4-7]. Зокрема, в схемі NMPC-керування запропоновано використовувати моделі Вінера, у роботі Потмана використовуються моделі на основі радіально-базисних функцій, у роботі Портуяна – моделі Гаммерштейна [3-7].

Отже, для вирішення завдання розробки системи прогнозуючого керування процесом випалювання обкотишів необхідно здійснити вибір структури динамічних моделей процесів термічної обробки обкотишів у технологічних зонах випалювальної машини, а також методів оперативного оцінювання параметрів відповідних моделей, що дозволить здійснювати ідентифікацію об'єкта керування в режимі реального часу та забезпечить високу точність математичного опису процесу.

Дослідження можливості апроксимації процесів термічної обробки обкотишів певним класом моделей здійснювалося методом імітаційного моделювання за даними про залежність температури  $T_{\text{вз}}$  в зоні випалювання під пальниками №3 та 4 від режимних параметрів процесу – витрати газу  $Q_{\text{г}}$ , тиску в горні  $P_{\text{гз}}$  та швидкості візків випалювальної машини  $V_{\text{ом}}$ , отриманими в режимі пасивного експерименту на конвеєрній випалювальній машині ОК-324 ПАТ «Центральний ГЗК».

Оскільки на сьогодні для ідентифікації об'єктів керування широкого застосування набули статистичні методи на основі кореляційного та регресійного аналізу, то на першому етапі дослідження було обрано такі лінійні параметричні моделі:

- авторегресійну модель з наявністю зовнішнього входу (ARX);
- авторегресійну модель ковзного середнього з наявністю зовнішнього входу (ARMAX);
- модель похибки вихідної величини (OE).

Також досліджувалася можливість апроксимації процесів термічної обробки обкотишів моделями у вигляді передавальних функцій (TF).

Для вибору конкретної структури лінійної параметричної моделі (тобто, степенів поліномів) з набору моделей-кандидатів, що належать до певного класу (ARX, ARMAX, OE, TF), було використано інформаційний критерій Акайке (AIC).

На рис.1 наведено графіки зміни температури в горні зони випалювання, розраховані на основі знайдених у результаті ідентифікації параметричних моделей, та відповідні експериментальні значення температури.

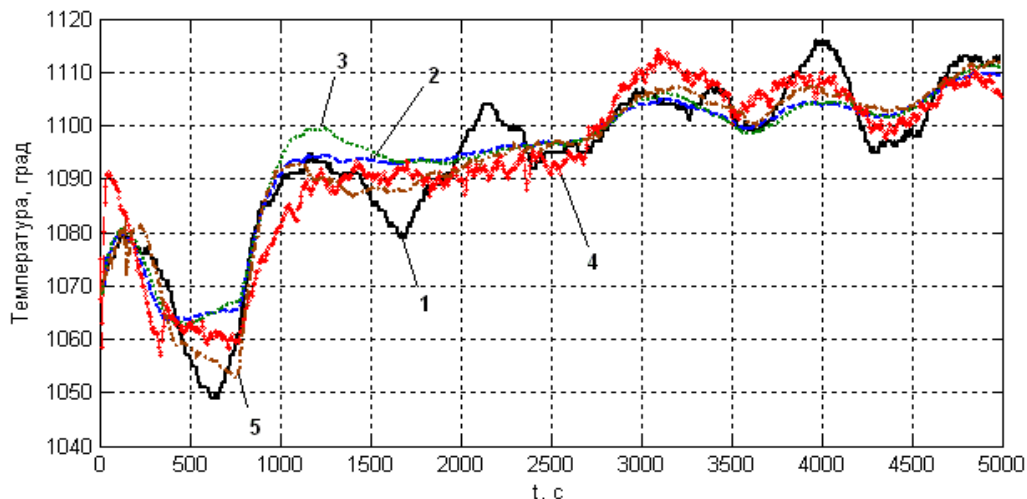


Рис.1 – Результати дослідження ефективності використання лінійних моделей для оперативної ідентифікації процесу регулювання температури в горні зони випалювання: 1 – експериментальні дані (температура  $T_{\text{вз}}$ );

2 – результати апроксимації об'єкта моделлю ARX; 3 – результати апроксимації об'єкта моделлю ARMAX; 4 – результати апроксимації об'єкта моделлю OE; 5 – результати апроксимації об'єкта моделлю у вигляді передаточних функцій

Зведені результати перевірки адекватності отриманих параметричних моделей наведено в табл. 1. Аналіз результатів ідентифікації при використанні параметричних моделей показує, що нормалізоване середньоквадратичне відхилення NRMSE результатів прогнозування від експериментальних даних складає від 6,02% (модель у вигляді передавальних функцій) до 8,59% (ARMAX-модель). Коефіцієнт варіації складає від 0,37% для моделі у вигляді передаточних функцій до 0,55% для моделі похибки вихідної величини (OE). Отже, найвища точність апроксимації серед лінійних параметричних моделей при прийнятній середній швидкості збіжності (табл.1) досягається при використанні моделей у класі передавальних функцій.

Таблиця 1

Сумарні характеристики параметричних моделей процесу регулювання температури в горні зони випалювання

Модель	Середня швидкість збіжності навчання (в епохах або ітераціях)	NRMSE, %	Коефіцієнт варіації, %
ARX	22	8,08	0,49
ARMAX	24	8,59	0,53
OE	48	6,33	0,55
TF	32	6,02	0,37

Виконані на основі отриманих моделей дослідження можливості прогнозування значення температури в горні зони випалювання на 2–3 кроки вперед показали, що відносна похибка перевищує 5% [8]. Цей факт обмежує можливості використання лінійних параметричних моделей у схемі MPC-керування. Отже, можна зробити висновок, що в умовах нестационарності в часі параметрів об'єкта керування лінійні параметричні моделі в цілому не задовольняють висунуті вимоги і не дозволяють забезпечити бажану точність прогнозування температури в технологічних

зонах випалювальної машини. Тому для подальших досліджень було обрано такі нелінійні динамічні моделі:

- нелінійну авторегресійну модель з наявністю зовнішнього входу (Nonlinear ARX);
- авторегресійну модель із зовнішнім входом на базі адаптивної нейро-нечіткої системи ANFIS (Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System);
- модель Гаммерштейна-Вінера (Hammerstein-Wiener), яка являє собою послідовне з'єднання нелінійного статичного, лінійного динамічного та ще одного нелінійного блоків.

На рис. 2 та 3 наведено результати порівняння реакції об'єкта регулювання температури в горні зони випалювання та реакцій отриманих нелінійних моделей на тестовий сигнал. Зведені результати перевірки адекватності отриманих нелінійних моделей наведено в табл. 2.

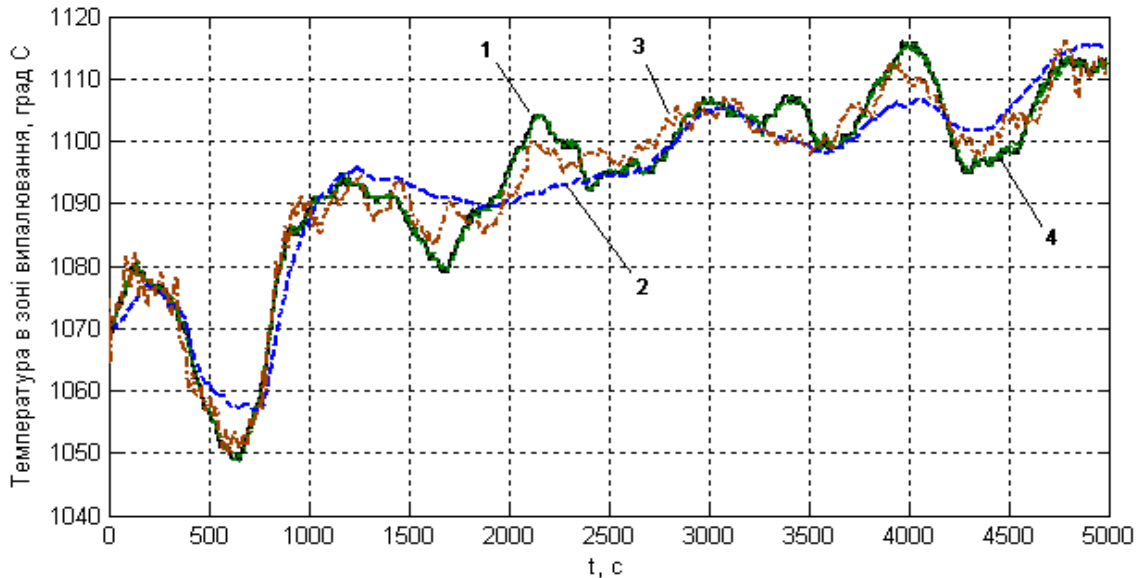


Рис.2 – Результати дослідження ефективності використання нелінійних моделей для оперативної ідентифікації процесу регулювання температури в горні зони випалювання:  
1 – експериментальні дані (температура  $T_{63}$ ); 2 – результати апроксимації об'єкта нелінійною ARX-моделлю; 3 – результати апроксимації об'єкта моделлю Гаммерштейна-Вінера; 4 – результати апроксимації об'єкта ANFIS-моделлю

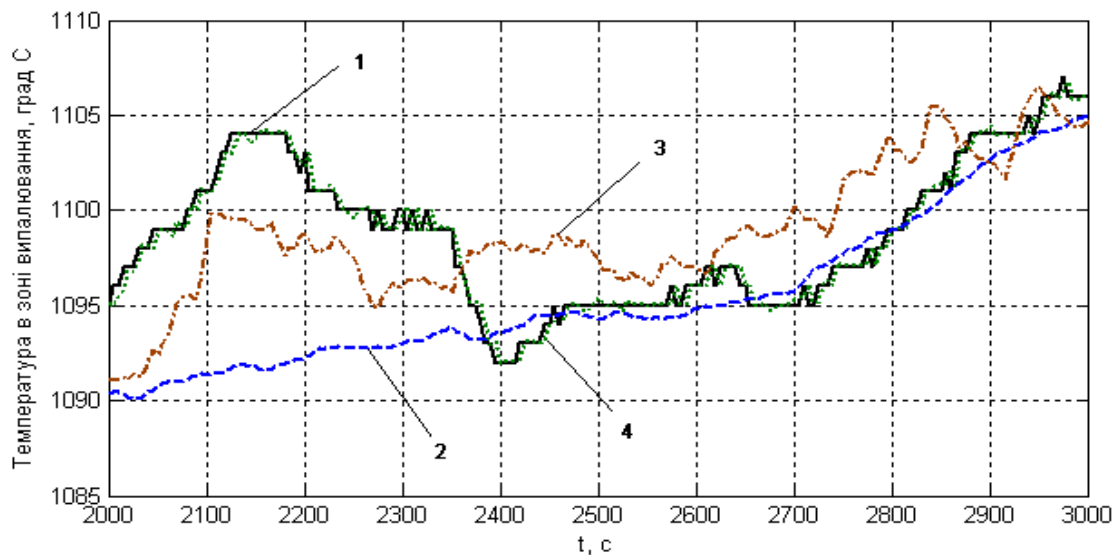


Рис. 3 – Результати дослідження ефективності використання нелінійних моделей для оперативної ідентифікації процесу регулювання температури в горні зони випалювання (деталізований фрагмент): 1 – еталонний сигнал (температура);  
2 – результати апроксимації об'єкта нелінійною ARX-моделлю;  
3 – результати апроксимації об'єкта моделлю Гаммерштейна-Вінера;  
4 – результати апроксимації об'єкта ANFIS-моделлю

Сумарні характеристики нелінійних моделей процесу регулювання температури в горні зони випалювання, одержаних у результаті ідентифікації

Модель	Середня швидкість збіжності навчання (в епохах або ітераціях)	NRMSE, %	Коефіцієнт варіації, %
Nonlinear ARX	43	7,28	0,45
Hammerstein-Wiener	36	4,92	0,3
ANFIS	46	0,64	0,06

Встановлено, що найменше значення нормованого середньоквадратичного відхилення (на рівні 0,64%) та коефіцієнта варіації (на рівні 0,06%) досягається для моделі на базі ANFIS-системи (рис.2, 3). При використанні моделі Гаммерштейна-Вінера нормована середньоквадратична похибка апроксимації є більшою, але водночас забезпечується найвища середня швидкість збіжності навчання (36 ітерацій), що можна пояснити меншою кількістю вільних параметрів моделей, що налаштовуються в процесі ідентифікації [8].

Враховуючи, що фактично при однаковій середній швидкості збіжності нелінійних моделей суттєво менша похибка апроксимації забезпечується для моделі на базі адаптивної нейро-нечіткої системи ANFIS, можна зробити висновок, що відповідні моделі доцільно використовувати для оперативної ідентифікації процесів термічної обробки обкотишів у технологічних зонах КВМ.

#### ВИСНОВКИ

На основі експериментальних даних виконано дослідження моделей та методів оперативної ідентифікації процесів термічної обробки обкотишів. У результаті порівняння лінійних параметричних моделей (ARX, ARMAX, OE), передавальних функцій, нелінійної авторегресійної моделі з наявністю зовнішнього входу (Nonlinear ARX), авторегресійної моделі із зовнішнім входом на базі системи ANFIS та моделі Гаммерштейна-Вінера показано, що найкращий результат при ідентифікації процесів термічної обробки обкотишів за критерієм мінімальної похибки апроксимації досягається при використанні моделі на базі системи ANFIS (нормована середньоквадратична похибка апроксимації – до 0,6%, коефіцієнт варіації – до 1,25%). Це дозволяє рекомендувати авторегресійні моделі на базі системи ANFIS для оперативної ідентифікації процесів термічної обробки обкотишів.

Завдяки розповсюдженню інтегрованих систем для керування, тобто змішаних систем на основі швидкодіючих промислових контролерів і персональних комп'ютерів, такі системи знаходять все більше місця в проектній практиці керування розподіленими системами.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Рубан С.А. Розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей / С.А. Рубан, В.Й. Лобов // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2008. – № 1. – С. 69–74.
2. Garcia C. E. Model predictive control: theory and practice – a survey / C. E. Garcia, D.M. Prett, M. Morari // Automatica. – 1989. – Vol. 25, № 3. – P. 335–348.
3. Lee J.H. State-space interpretation of model predictive control / J. H. Lee, M. Morari, C. E. Garcia // Automatica. – 1994. – Vol. 30, № 4. – P. 707–717.
4. Gomez J.C. Wiener model identification and predictive control of a pH neutralisation process / J.C. Gomez, A. Jutan, E. Baeyens // IEE Proc.-Control Theory Appl. – 2004. – Vol. 151, № 3. – P. 329–338.

5. Поркуян О.В. Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.07 / О.В. Поркуян. – Кривий Ріг, 2009. – 379 с.
6. Pottmann M. A nonlinear predictive control strategy based on radial basis functions models/ M. Pottmann, D. Seborg // Comput. Chem. Eng. – 1997. – № 21 (9). – P. 965–980.
7. Fruzzetti K. Nonlinear model predictive control using Hammerstein models / K. Fruzzetti, A. Palazoglu, K. McDonald // Process Control. – 1997. – 7 (1). – P. 31–41.
8. Рубан С. А. Автоматизація процесу керування термічною обробкою залізорудних обкотишів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / С. А. Рубан ; Криворіз. техн. ун-т. — Кривий Ріг, 2011.