

**АДАПТИВНЕ ПРОГНОЗУЮЧЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ
ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ОБКОТИШІВ
З ОПЕРАТИВНИМ ОЦІНЮВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ
З ВИКОРИСТАННЯМ РЕКУРСИВНОГО АЛГОРИТМУ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ**

У статті розглянуто питання розробки системи адаптивного прогнозного керування процесами термічної обробки обкотишів з оперативним оцінюванням параметрів процесу з використанням рекурсивного алгоритму найменших квадратів. Розроблено модель для дослідження ефективності застосування рекурсивного алгоритму найменших квадратів у складі системи адаптивного прогнозного керування процесом термічної обробки обкотишів та виконано її моделювання у пакеті Simulink. Отримана система продемонструвала високу якість оперативного оцінювання параметрів процесу, що дозволяє рекомендувати розроблений метод формування адаптивного прогнозного керування для керування процесами термічної обробки обкотишів.

Ключові слова: адаптивне прогнозує керування, термічна обробка обкотишів, оперативне оцінювання параметрів, рекурсивний алгоритм найменших квадратів

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Збагачення залізорудної сировини на гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК) найчастіше закінчується стадією спікання концентрату в агломераційних або випалювальних машинах. З точки зору особливостей доменного процесу кінцевий продукт випалювальних машин - обкотиши - має низку переваг у порівнянні з агломератом, а саме: високу міцність при тривалому зберіганні, транспортуванні та перевантаженні, більш рівномірний гранулометричний склад, що забезпечує кращу газопроникність шару шихтових матеріалів у процесі доменної плавки і, як наслідок, сприяє збільшенню продуктивності плавки чавуну та зменшенню кількості шлаків. Крім того, сировиною для виробництва обкотишів найчастіше є тонкоподрібнені концентрати, частка яких у продукції вітчизняних збагачувальних фабрик останнім часом зростає, що пов'язано зі зменшенням запасів багатих руд та збільшенням частки бідних та важкозбагачувальних різновидів руд у шихті. Основним агрегатом, який впливає на продуктивність фабрики згрудкування та якість готової продукції, є конвеєрна випалювальна машина, на якій відбувається термічна обробка обкотишів. Аналіз техніко-економічних показників діяльності та результатів модернізації фабрик згрудкування потенційних конкурентів показує, що на вітчизняних КВМ існують резерви збільшення питомої продуктивності - на 10-15 %, зменшення питомої витрати природного газу на 15-20 % [1]. Одним із найбільш перспективних напрямків вирішення поставлених завдань є вдосконалення методів та систем автоматизації процесів термічної обробки обкотишів. Але, незважаючи на значну кількість досліджень та розробок, наявні системи автоматизації процесу не завжди дозволяють вирішувати завдання зниження питомої витрати енергоносіїв та стабілізації профілю температур у шарі при коливаннях якісних характеристик сирих обкотишів, гранулометричного складу та порозності шару, змінах параметрів технологічного устаткування та наявності завод у каналах вимірювання.

Аналіз досліджень і публікацій. У відомих роботах вітчизняних та закордонних авторів [2-5] наголошується, що для вирішення завдань вдосконалення систем автоматичного керування нелінійними інерційними об'єктами, зокрема технологічними процесами збагачення та переробки залізорудної сировини, останнім часом широко застосовуються методи теорії керування на основі прогнозуючих моделей (Model Predictive Control, MPC). Методи керування з використанням прогнозуючої моделі належать до класу алгоритмів, в яких динамічна модель використовується для прогнозування та оптимізації процесу в режимі реального часу. Перевагами цих методів є відносна простота схеми формування зворотного зв'язку та високі адаптивні властивості, що дозволяє здійснювати квазіоптимальне керування нелінійними нестационарними об'єктами зі складною структурою в режимі реального часу з урахуванням обмежень на керуючі та вихідні змінні, враховувати зміни критеріїв якості керування в процесі роботи тощо [2,3]. Позитивний досвід практичного використання методів керування з прогнозуючими моделями дозволяє розглядати їх як альтернативу використанню класичних параметричних ПІ- та ПІД-регуляторів [2].

У базовому варіанті методу керування з прогнозуючою моделлю [6-7] 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. Але, за свідченнями авторів [8], для суттєво нелінійних та нестационарних процесів ефективність алгоритмів МРС-керування з використанням лінійних моделей виявляється недостатньою. 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 [2, 8, 9]. Також одним з перспективних шляхів вирішення проблеми формування прогнозуючого керування для нелінійних нестационарних процесів є застосування систем адаптивного прогнозуючого керування. У відповідності з [10], адаптивне прогнозує керування можна розглядати як один з варіантів реалізації адаптивного оптимального керування, що уявляє собою сукупність взаємопов'язаних алгоритмів оцінювання параметрів об'єкта керування, оцінювання його стану та безпосередньо алгоритмів формування керування. Формування керування здійснюється шляхом розв'язання оптимізаційної задачі з використанням прогнозуючої моделі процесу безпосередньо під час функціонування системи керування (в режимі реального часу). При цьому можуть використовуватися прогнозуючі моделі різних класів та складності. Зокрема, у роботі [8] в схемі NMPC-керування запропоновано використовувати моделі Вінера, у роботі [9] використовуються моделі на основі радіально-базисних функцій, у роботах [2,11] - моделі Гаммерштейна, у роботах [1,12] - моделі ANFIS, у роботі [13] - гібридні блочно-орієнтовані моделі на базі моделей Вінера та Гаммерштейна-Вінера з системою ортонормованих базисних функцій Лаггера. Оскільки при реалізації схем NMPC-керування доводиться вирішувати завдання нелінійного програмування, суттєво зростає обчислювальне навантаження на мікропроцесорні засоби керування, що може призводити до неприпустимого збільшення періоду дискретизації при формуванні сигналів керування об'єктом. Для блочно-орієнтованих моделей цей недолік можна усунути шляхом застосування методу інверсії статичної не лінійності, як пропонується в роботах [13,14]. Водночас, для широкого кола об'єктів керування, що протягом тривалого часу функціонують у режимах, близьких до номінальних, при формуванні адаптивного прогнозуючого керування може бути застосований варіант лінеаризації нелінійної моделі процесу навколо робочої точки з подальшим застосуванням алгоритмів формування керуючих впливів у відповідності з методами лінійного МРС-керування. Такий підхід може бути застосований і для керування процесами термічної обробки обкотишів у опалювальних зонах конвеєрної випалювальної машини, оскільки продуктивність за живленням, а, отже, швидкість візків і висота шару обкотишів, підтримуються сталими протягом тривалого часу функціонування КВМ.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у розробці принципів та структури адаптивного автоматизованого керування процесами термічної обробки обкотишів на базі прогнозуючої моделі, що забезпечують підтримання заданого температурного режиму випалювання обкотишів в умовах коливань гранулометричного складу та порозності шару, зміни параметрів технологічного устаткування, наявності завад у каналах вимірювання, і, як наслідок, забезпечують покращення якісних характеристик кінцевого продукту, збільшення продуктивності випалювальної машини за рахунок зменшення долі некондиційних обкотишів, зниження питомої витрати енергоносіїв.

Викладення матеріалу та результати. Для збільшення продуктивності, отримання високих показників якості обкотишів, зменшення питомої витрати енергоносіїв необхідно забезпечити бажаний розподіл температур уздовж випалювальної машини шляхом стабілізації температури в кожній газоповітряній камері [15,16]. Отже, основною технологічною метою керування температурним режимом випалювання вважатимемо стабілізацію температури в кожній газоповітряній камері машини з мінімальними відхиленнями від заданих значень за мінімальних витрат теплоносія. Для опалювальних зон КВМ (підігріву та випалювання) стабілізацію температури доцільно здійснювати шляхом зміни витрати газу на пальники з одночасним підтриманням заданого співвідношення «газ-повітря» з метою повного спалювання газу [15,16].

Одночасно необхідно підтримувати рівномірний розподіл температурного поля за шириною візка. При реалізації індивідуальних контурів керування температурою в газоповітряній

камері для обох боків КВМ спостерігається помітний вплив пальників на показання термопар протилежного боку, що в цілому негативно впливає на рівномірність теплового поля за шириною візка [16]. Тому зазвичай схему керування реалізують таким чином, що залежно від усередненого значення температури, вимірюваної в двох точках горна, змінюють витрату газу на пальник з одного боку КВМ, витрата газу на пальник іншого боку автоматично дублюється. Для кожного пальника окремими контурами також підтримується задане співвідношення «газ-повітря» за результатами вимірювання дійсної витрати газу. При такому підході для забезпечення заданої програми змінення температури в окремій газоповітряній камері КВМ дуже важливо забезпечити формування сигналу завдання підлеглому контуру керування витратою газу ведучої сторони. З урахуванням нестационарності параметрів процесу термічної обробки обкотишів, що пов'язана з коливаннями гранулометричного складу та порозності шару, зміною параметрів технологічного устаткування, прийнято рішення про доцільність застосування для вирішення цього завдання методів адаптивного прогнозуючого керування.

У роботі [10] показано, що формування адаптивного прогнозуючого керування може уявляти собою поєднання сполученого синтезу оптимального керування стохастичним об'єктом в припущенні про точне вимірювання змінних стану та значень параметрів об'єкту керування, з процедурами оцінювання змінних стану та параметрів. Отже, структура системи адаптивного прогнозуючого керування температурним режимом випалювання обкотишів в певній газоповітряній камері повинна складатися з чотирьох блоків: об'єкту керування з датчиками, блоку оперативного оцінювання параметрів об'єкту керування, спостерігача стану для відновлення неконтрольованих змінних стану об'єкта, та блоку, що розраховує оптимальне на горизонті прогнозу програмне керування. Один з можливих варіантів структури системи адаптивного прогнозуючого керування температурним режимом випалювання обкотишів в певній газоповітряній камері КВМ наведено на рис. 1.

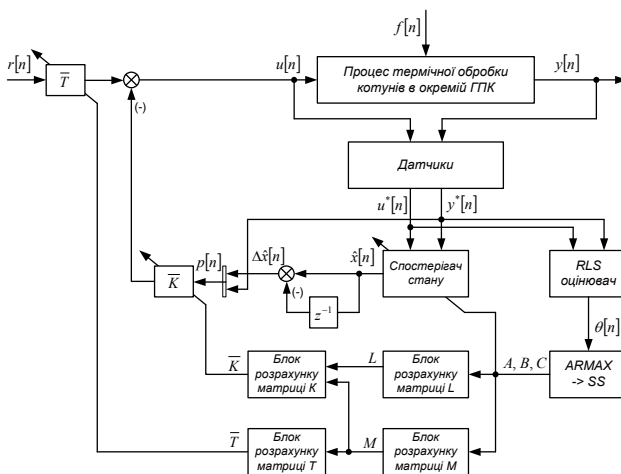


Рис. 1. Структурна схема системи адаптивного прогнозуючого керування процесом термічної обробки обкотишів з оперативним оцінюванням параметрів процесу з використанням алгоритму RLS

Відповідно з принципами прогнозуючого керування, для оцінювання якості керування на інтервалі прогнозування доцільно використовувати узагальнений квадратичний функціонал з ковзним інтервалом оптимізації

$$J_n = \sum_{j=1}^P \left[(T_{знк}^{завд}[n+j] - \hat{T}_{знк}[n+j]) \cdot R[n+j] \cdot (T_{знк}^{завд}[n+j] - \hat{T}_{знк}[n+j]) + Q_{зл}[n+j-1] \cdot S[n+j-1] \cdot Q_{зл}[n+j-1] \right] \quad (1)$$

де $\hat{T}_{знк}[n+j]$, $T_{знк}^{завд}[n+j]$ - відповідно прогнозоване та задане значення температури на кроці $n+j$; $Q_{зл}[n+j-1]$ - значення керуючої дії - витрати газу на пальник ведучої (лівої) сторони; $R[n+j]$ - вагові коефіцієнти, які оцінюють ступінь небажаності відхилення температури на кроці $n+j$ від заданого значення; $S[n+j-1]$ - коефіцієнти, що враховують вартість енергії керуючої дії; P - інтервал прогнозування.

Отже, відповідно до поставленої мети керування задачу пошуку оптимальної на інтервалі P програми зміни керуючої дії можна сформулювати як задачу знаходження векторної функції

$$\overline{Q}_{зл}[n] = [Q_{зл}[n], Q_{зл}[n+1], \dots, Q_{зл}[n+P-1]]^T, \quad (2)$$

що мінімізує функціонал (1)

$$J_n(Q_{зл}[\bullet], P) \rightarrow \min_{Q_{зл} \in M}, \quad (3)$$

де M - допустима множина керувань.

Відповідно до методики синтезу [17], основні етапи якого описано нижче, для лінійної моделі об'єкту керування розв'язок задачі (2)-(3), що додатково забезпечує астатизм замкненої системи за керованими змінними, можна представити у вигляді

$$\bar{v} = \bar{K}p[n] + \bar{T}r[n], \quad (4)$$

де $p[n] = (\Delta x[n]; T_{знк}[n])^T$ - вектор стану прогнозуючої моделі; $\Delta x[n] = x[n] - x[n-1]$;

$\bar{r}[n] = T_{знк}^{забод}[n]$ - задане значення температури у відповідній ГПК на кроці n ;

$$\bar{K} = -(M^T R M + Q)^{-1} M^T R L, \quad \bar{T} = (M^T R M + Q)^{-1} M^T R. \quad (5)$$

Матриці M та L розраховуються за наступними формулами [17]

$$L = \left(\begin{array}{cccc} \bar{C}A & \bar{C}A^2 & \dots & \bar{C}A^P \end{array} \right)^T, \quad (6)$$

$$M = \left(\begin{array}{cccc} \frac{\bar{C}B}{\bar{C}AB} & \frac{0}{\bar{C}B} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\bar{C}A^{P-1}B}{\bar{C}A^{P-2}B} & \dots & \dots & \dots \end{array} \right), \quad (7)$$

де матриці $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ задаються наступними виразами

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} A & 0_{n \times r} \\ AC & E_{r \times r} \end{pmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{pmatrix} B \\ CB \end{pmatrix}, \quad \bar{C} = (0_{r \times n} : E_{r \times r}), \quad (8)$$

де $0_{n \times r}$ - нульова матриця розмірністю $(n \times r)$; $E_{r \times r}$ - одинична матриця розмірністю $(r \times r)$.

Оскільки параметри об'єкту A, B та C змінюються в процесі функціонування, необхідно періодично здійснювати перерахунок матриць \bar{K} та \bar{T} , що використовуються для розрахунку керуючої дії за виразом (4) на основі результатів оперативного оцінювання параметрів блоком ідентифікації. Для реалізації цього завдання може бути використаний один з відомих алгоритмів оперативного (онлайн) оцінювання параметрів. У роботі для визначення параметрів моделі процесу термічної обробки обкотишів в певній газоповітряній камері KBM пропонується використовувати рекурсивний алгоритм найменших квадратів (Recursive Least Square Estimation, RLS).

Відповідно з алгоритмом RLS, вектор оцінюваних параметрів системи $\theta[n]$ на кроці n обчислюється за формулою [18]

$$\theta[n] = \theta[n-1] + \gamma[n-1](y[n] - \varphi^T[n]\theta[n-1]), \quad (9)$$

де $y[n] = T_{знк}[n]$ - поточне значення керованої величини - температури у певній газоповітряній камері KBM;

$$\gamma[n-1] = P[n]\varphi[n], \quad (10)$$

а матриця $P[n]$ обчислюється за рекурентною формулою

$$P[n] = P[n-1] - P[n-1]\varphi[n](1 + \varphi^T[n]P[n-1]\varphi[n])^{-1}\varphi^T[n]P[n-1], \quad (11)$$

з початковими умовами

$$P[n_0] = [\varphi^T[n_0]\varphi[n_0]]^{-1}, \quad (12)$$

$$\theta[n_0] = P[n_0]\varphi^T[n_0]\bar{y}[n_0]. \quad (13)$$

Матриці $\theta[n_0]$ та $\bar{y}[n_0]$, що використовуються для розрахунку початкових умов, мають вигляд

$$\varphi[n_0] = \begin{bmatrix} \varphi[0] \\ \varphi[1] \\ \vdots \\ \varphi[n_0-1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -T_{знк}[N_a-1] & \dots & -T_{знк}[0] & Q_{зл}[N_b-1] & \dots & Q_{зл}[0] \\ -T_{знк}[N_a] & \dots & -T_{знк}[1] & Q_{зл}[N_b] & \dots & Q_{зл}[1] \\ \dots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \dots \\ -T_{знк}[N_a+n_0-2] & \dots & -T_{знк}[n_0-1] & Q_{зл}[N_b+n_0-1] & \dots & Q_{зл}[n_0-1] \end{bmatrix}$$

$$\bar{y}[n_0]^T = [Q_{зл}[N_a] \quad Q_{зл}[N_a+1] \quad \dots \quad Q_{зл}[N_a+n_0-1]]$$

де N_a, N_b - відповідно максимальні затримки вихідної та вхідної величин у моделі ARMAX, що використовується для апроксимації залежності температури у певній газоповітряній камері КВМ від витрати газу на паливник ведучої сторони.

На наступному кроці отримана в результаті процедури оцінювання за рекурсивним алгоритмом найменших ARMAX-модель процесу термічної обробки обкотишів у певній газоповітряній камері КВМ представляється у вигляді моделі у просторі станів у канонічній формі спостережуваності [19] і далі коефіцієнти A,B,C отриманої моделі використовуються у формулах (5)-(8) для розрахунку матриць коефіцієнтів \bar{K} та \bar{T} , за якими здійснюється розрахунок заданого значення витрати газу на паливник ведучої сторони за формулою (5).

Для дослідження ефективності застосування алгоритму RLS для оперативного оцінювання параметрів у складі системи адаптивного прогнозного керування процесом термічної обробки обкотишів реалізовано модель системи у пакеті Simulink. Структуру моделі для дослідження ефективності застосування алгоритму RLS у складі системи адаптивного прогнозного керування процесом термічної обробки обкотишів приведено на рис. 2.

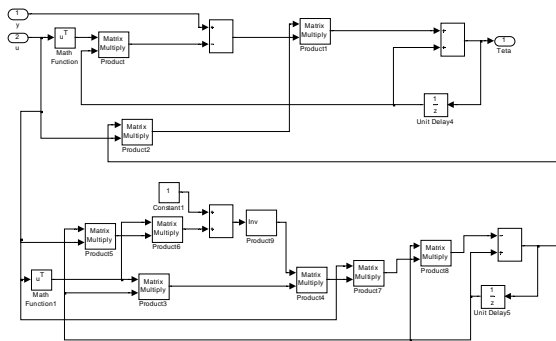


Рис. 2. Блок-схема реалізації рекурсивного алгоритму найменших квадратів

Дослідження здійснювалося методом імітаційного моделювання за даними про залежність температури $T_{гнк34}$ в зоні випалювання під паливниками №№3,4 від витрати газу $Q_{гн}$ на паливник ведучої сторони, отриманими в режимі пасивного експерименту на конвеєрній випалювальній машині ОК-324 ПАТ «Центральний ГЗК» при сталих значеннях висоти шару обкотишів та швидкості випалювальної машини.

На рис. 3 наведено графіки зміни температури в горні зони випалювання, розраховані на основі знайдених у результаті виконання процедури ідентифікації параметрів процесу термічної обробки обкотишів, та відповідні експериментальні значення температури.

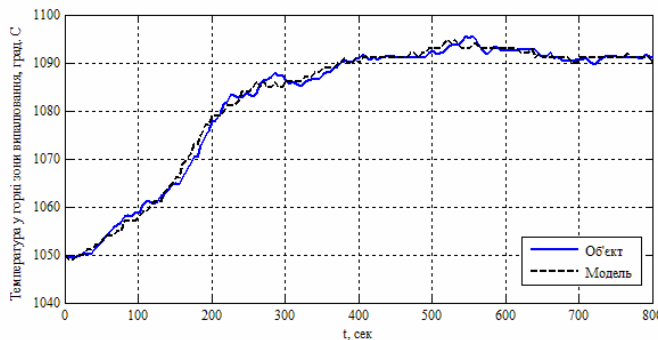


Рис. 3. Результати дослідження ефективності використання алгоритму RLS для оперативного оцінювання параметрів у складі системи адаптивного прогнозного керування процесом термічної обробки обкотишів

На рис. 4 наведено графіки змінення коефіцієнтів моделі процесу термічної обробки обкотишів в процесі функціонування розробленої адаптивного прогнозного керування.

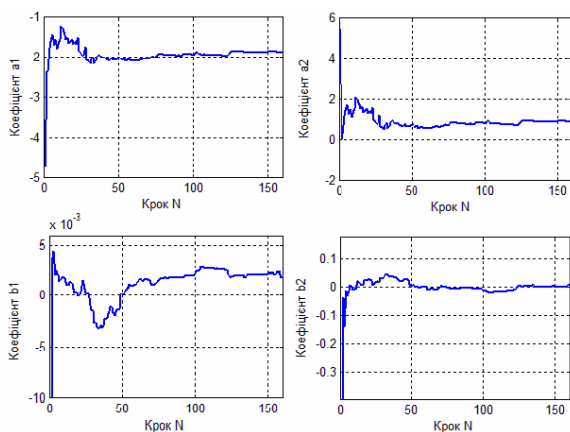


Рис. 4. Динаміка змінення коефіцієнтів моделі процесу термічної обробки обкотишів в процесі функціонування підсистеми оцінювання з використанням алгоритму RLS

Аналіз результатів ідентифікації параметрів процесу термічної обробки обкотишів при використанні рекурсивного алгоритму найменших квадратів у складі системи адаптивного прогнозного керування показує, що нормалізоване середньоквадратичне відхилення NRMSE результатів прогнозування від експериментальних даних не перевищує 7,32 %, коефіцієнт варіації - 0,63 %.

Швидкість збіжності процедури оцінювання параметрів від початку функціонування системи складає до 50 кроків.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Запропоновано метод формування адаптивного прогнозного керування процесами термічної обробки обкотишів з оперативним оцінюванням параметрів процесу з використанням рекурсивного алгоритму найменших квадратів. Такий підхід дозволяє забезпечити підтримання заданого температурного режиму випалювання обкотишів в умовах коливань гранулометричного складу та порозності шару, зміни параметрів технологічного устаткування, наявності завад у каналах вимірювання. Розроблено модель для дослідження ефективності застосування алгоритму RLS у складі системи адаптивного прогнозного керування процесом термічної обробки обкотишів та виконано її моделювання у пакеті Simulink.

Отримані результати підтверджують перспективність застосування розробленого методу формування адаптивного прогнозного керування для керування процесами термічної обробки обкотишів. У подальших дослідженнях планується удосконалити запропонований підхід для урахування обмежень на значення керуючої дії на кожному кроці керування.

Список літератури

1. Автоматизовані системи керування процесами термічної обробки котунів на конвеєрній випалювальній машині: монографія / **В.Й. Лобов, Л.І. Сфіменко, М.П. Тиханський, С.А. Рубан**. - Кривий Ріг: Видавець ФО-П Чернявський Д.О., 2015. - 250 с.
2. **Поркуня О.В.** Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна : дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.07 / **Ольга Вікторівна Поркуня**. - Кривий Ріг, 2009. - 379 с.
3. **Веремей Е.И.** Пособие «Model Predictive Control Toolbox» [Электронный ресурс] / **Е.И. Веремей, В.В. Еремеев, М.В. Сотникова** - Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/modelpredict/Book1/index.php>. - Загл. с экрана.
4. **Morari M.** Model predictive control: past, present and future / **M. Morari, Jay H. Lee** // *Computers and Chemical Engineering*. - 1999. - Vol. 23. - P. 667-682.
5. **Roubos J.A.** Fuzzy model-based predictive control using Takagi-Sugeno models / **J.A. Roubos, S. Molloy, R. Babuska, H.B. Verbruggen** // *International Journal of Approximate Reasoning*. - 1999. - Vol. 22. - P. 3-30.
6. **Garcia C. E.** Model predictive control: theory and practice - a survey / **C. E. Garcia, D.M. Prent, M. Morari** // *Automatica*. - 1989. - Vol. 25, № 3. - P. 335-348.
7. **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.
8. **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.
9. **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.
10. **Буков В.Н.** Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом / **В.Н. Буков**. - М.: Наука, 1987. - 232 с.
11. **Fruzzetti K.** Nonlinear model predictive control using Hammerstein models / **K. Fruzzetti, A. Palazoglu, K. McDonald** // *Process Control*. - 1997. - 7 (1). - P. 31-41.
12. **Рубан С.А.** Автоматизация процессу керування термічною обробкою залізорудних обкотишів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / **С.А. Рубан** // КТУ. - Кривий Ріг, 2011. - 20 с.
13. **Михайленко О.Ю.** Керування процесом дроблення руди з використанням блочно-орієнтованої прогнозуючої моделі / **О.Ю. Михайленко** // *Технологический аудит и резервы производства*. - 2015. - №4/3 (24). - С. 28-32.
14. **Patikirikoral T.** Hammerstein-Weiner Nonlinear Model Based Predictive Control For QoS Management in Complex Software Systems / **T. Patikirikoral, L. Wang, A. Colman, J. Han** // *Control Engineering Practice*. - 2012. - Vol. 20, № 1. - P. 49-61. doi:10.1016/j.conengprac.2011.09.003.
15. **Гончаров Ю.Г.** Автоматизация процессов окискования железных руд / **Ю.Г. Гончаров, А.В. Дримбо, А.Д. Ищенко**. - М.: Металлургия, 1983. - 190 с.
16. **Ксендзовский В.Р.** Автоматизация процесса производства окатышей / **В.Р. Ксендзовский**. - М.: Металлургия, 1971. - 216 с.
17. **Веремей, Е.И.** Управление с прогнозирующими моделями / **Е.И. Веремей, М.В. Сотникова**. - СПб.: СПбГУ, 2014. - 212 с.
18. **Льюнг Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя / Под. ред. **Я.З. Цыпкина**. - М.: Наука, 1991 - 432 с.
19. **Candy J.V.** Model-based signal processing / **James V. Candy**. - New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2005. - 704 p.

Рукопис подано до редакції 17.04.15