

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/20>**Жученко А.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Путятін Р.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЬНО-ПРОГНОЗУЮЧОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ВИРОБІВ З УРАХУВАННЯМ НЕТОЧНОСТІ МОДЕЛІ

Досліджено ефективність системи модельно-прогнозуючого керування процесом випалювання вуглецевих виробів при використанні в ній точної (в певному розумінні) та неточної математичних моделей. Як показники ефективності керування розглядалися наступні: кінцеве значення температури у заготовці з найменшою температурою, найбільший перепад температур у заготовці з найбільшою температурою, тривалість перехідного процесу випалювання, сумарна витрата палива за час перехідного процесу.

Враховуючи, що задачею даного дослідження було аналіз не стільки абсолютних значень, скільки тенденції зміни показників ефективності керування при відхиленні параметрів математичної моделі, що використовується у системі керування, від їх номінальних значень, в якості моделей розглядалися аперіодичні ланки другого порядку за всіма досліджуваними каналами. Чисельні значення математичних моделей ідентифіковані за експериментальними даними.

Представлені результати дослідження впливу зміни кожного з розглядуваних параметрів математичних моделей (коефіцієнти передачі, сталі часу) на ефективність керування. Дані результати мають якісний характер, тобто показують чи сприяє (не сприяє) збільшення (зменшення) даного параметру ефективності керування.

Проведено дослідження особливостей системи модельно-прогнозуючого керування в умовах використання точної та неточної математичних моделей. Сформульовані умови визначення тривалості перехідних процесів.

Точна математична модель забезпечує підвищення ефективності керування, швидкості нагрівання, дозволяє зменшити витрати палива. При цьому дотримуються задані обмеження на швидкість нагрівання, що дозволяє мінімізувати обсяги браку.

Неточність моделі призводить до збільшення перепаду температур у гарячій заготовці (зі значним порушенням обмежень), збільшує тривалість перехідного процесу і сумарну витрату пального порівняно з керуванням, побудованим за точною моделлю.

Показано необхідність пошуку альтернативних способів урахування неточностей математичних моделей, які використовуються у системі модельно-прогнозуючого керування процесом випалювання вуглецевих виробів, для забезпечення перебігу процесу у заданих технологічних межах.

Ключові слова: ефективність керування, МП-регулятор, неточна модель, якість керування, випалювання, вуглеграфітові вироби.

Постановка проблеми. Вуглеграфітові вироби застосовують у різних галузях техніки, зокрема в чорній та кольоровій металургії, які є провідними в економіці України. Випалювання є одним із завершальних етапів виробництва вуглеграфітових виробів. Цей етап належить до найбільш тривалих (тривалість всієї кампанії випалювання становить сотні годин), інерційних і енерговитратних в усьому циклі виробництва. Саме тому задача підвищення ефективності процесу випалювання шляхом оптимізації енерговитрат є актуаль-

ною науково-технічною задачею. Одним із шляхів розв'язання даної задачі є створення і впровадження у виробництво енергоощадної системи керування процесом випалювання.

Найпоширенішими технологічними апаратами, де відбувається процес випалювання вуглецевих виробів, є кільцеві печі типу «Рідгаммер». Піч даного типу складається з однакових камер (порядку 10–20), в які завантажуються вуглеграфітові заготовки. Піч обладнана рухомим газовим пальником, який послідовно пересувають від

камери до камери. Камера, на якій наразі розміщено пальник – камера «під вогнем», – має найвищу температуру, порядку 1300°C. Ця камера є основним об'єктом керування, всі інші камери (стадії процесу випалювання) залежать від режиму роботи в ній, і, з точки зору організації керування процесом випалювання в цілому, можуть впливати тільки на обмеження, які треба враховувати. Саме тому у даному дослідженні розглядаються питання керування виключно камерою «під вогнем».

Будь-які математичні моделі (у тому числі моделі з розподіленими параметрами) відображають тільки певні властивості об'єкту керування і у більшій чи меншій мірі є неточними. Використання у системі керування спрощених математичних моделей, як згадувалося вище, робить ще більш актуальним питання впливу неточності моделі на ефективність процесу керування. Тому дослідження впливу неточності математичної моделі керованого об'єкту на ефективність системи керування ним є важливим етапом синтезу останньої.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1, 3, 6] обґрунтована доцільність використання модельно-прогнозуючого регулятора (МП-регулятора) у системі керування процесом випалювання вуглецевих виробів.

Керування, побудоване на основі МП-регулятора, передбачає використання математичної моделі керованого процесу. У роботах [2, 6] наведена математична модель процесу випалювання з розподіленими параметрами, яка представляє собою систему диференціальних рівнянь у частинних похідних. Використання такої моделі у системі керування реального часу неможлива у зв'язку із значною тривалістю розрахунків за цією моделлю.

У роботі [6] побудовано спрощену за методом Фур'є [6] математичну модель процесу випалювання в печі типу «Рідгаммер». Використовуючи дану модель, доведено переваги керування на основі МП-регулятора порівняно з ПІД- і селективним ПІД-регуляторами. В роботах [6, 8] показано, що збільшення горизонту прогнозування збільшує тривалість кампанії випалювання, а збільшення горизонту керування зменшує її.

Мета статті. У зв'язку з наведеними вище обставинами та обґрунтуванням постановки проблеми метою даної статті є дослідження впливу параметрів налаштування МП-регулятора та неточності прогнозуючої моделі на показники ефективності системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів.

Виклад основного матеріалу. Згідно постановки задачі керування процесом випалювання вуглецевих виробів [4] до параметрів, які впливають на ефективність керування і підлягають визначенню відносяться: період дискретизації T_s , горизонт прогнозування p та горизонт керування m

МП-регулятора, а також параметр налаштування^и. Однак перші три параметри не рекомендовано використовувати як параметри налаштування [9], натомість вибрано такі їх значення: період дискретизації $T_s = 0,1$ год; горизонт керування $m = 10$ кроків (10 кроків за першу годину горизонту прогнозування, потім фіксоване значення); горизонт прогнозування $p = 40$ кроків (4 год).

Для реалізації алгоритму керування [4] потрібно мати математичні моделі, які зв'язують витрати палива з температурами у 3-х точках: точка 1 – найбільша температура у заготовці з найвищою температурою в гарячій зоні камери «під вогнем» θ_1 , найменша температура у тій самій заготовці θ_2 , точка 3 – найнижча температура серед усіх заготовок θ_3 .

У даному дослідженні ставилася задача оцінити не стільки кількісний, скільки якісний вплив неточності визначення параметрів математичної моделі об'єкту керування на ефективність самого керування. Тому в якості номінальної моделі по всім 3-м каналам дії розглядалася аперіодична ланка 2-го порядку з передатною функцією

$$W_i(s) = \frac{K_i}{(T_{1,i}s + 1)(T_{2,i}s + 1)} \quad (1)$$

де K_i – коефіцієнт підсилення, °C·год/м³; $T_{1,i}$ і $T_{2,i}$ – сталі часу, год. Їхні числові значення для кожного з каналів дії ідентифіковано за експериментальними даними у відповідності до умов дослідження.

Ефективність процесу керування випалюванням вуглецевих виробів оцінювалась за такими показниками: тривалість перехідного процесу T_f , сумарна витрата палива за перехідний процес Q_Σ , максимальний перепад температур в гарячій заготовці (різниця температур точок 1 і 2) $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$, температура точки 3 після виходу у статичний режим $\theta_3(T_f)$.

Неточні математичні моделі формувались із номінальних шляхом зміни їх параметрів.

У результаті проведеного моделювання отримані якісні оцінки впливу відхилень параметрів моделей від їх номінальних значень на якість процесу керування (табл. 1).

Таблиця 1
Вплив зміни параметрів моделей на якість керування

Точка	Точка 1		Точка 2		Точка 3	
Параметр	K	T	K	T	K	T
Зменшення	+	-	-	+	-	+
Збільшення	-	+	+	-	+	-

У табл. 1 за сприятливі результати зміни параметрів моделей (позначено як «+») прийнято зменшення $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$, T_f та Q_Σ , збільшення $\theta_3(T_f)$, за несприятливі (позначено як «-») – збільшення $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$, T_f та Q_Σ , зменшення $\theta_3(T_f)$.

Всі подальші симуляції було проведено для номінальної (точної) моделі та для моделі з най-

більш несприятливими відхиленнями (за сумарним ефектом змін параметрів згідно табл. 1) (неточної моделі). Для симуляції з неточною моделлю всі параметри номінальної моделі було змінено на 3 % від початкових значень у несприятливий бік. Значення обмеження $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$ варійовано від 70 до 160°C з кроком 10°C. Тривалість перехідного процесу було визначено наступним чином:

$$T_f = \begin{cases} \min_{r_3^y \leq \Delta\theta_3} t, \text{ якщо } \max_{0 \leq t \leq T_f} \Delta\theta_3 \geq r_3^y \\ \min_{\Delta\theta_3 = \max \Delta\theta_3} t, \text{ якщо } \max_{0 \leq t \leq T_f} \Delta\theta_3 < r_3^y \end{cases}$$

де r_3^y – значення завдання для θ_3 . Іншими словами, тривалість перехідного процесу – це або час першого досягнення величиною $\Delta\theta_3(T_f)$ її значення за завданням, або час першого досягнення максимуму відхилення впродовж процесу, якщо цей максимум менший за значення завдання для θ_3 .

Обрано тривалість симуляції 350 год. Сумарну витрату палива визначено від початкового моменту до моменту закінчення перехідного процесу. Типові динамічні графіки наведено на рис. 1 та 2, де $(\theta_1 - \theta_2)_{max} = 110^\circ\text{C}$, $w^u = 0$.

Горизонтальні червоні пунктирні лінії позначають: межі керування u_{min}, u_{max} (графік (t, Q)); сумарну витрату палива Q_Σ впродовж процесу зі сталою витратою палива (графік (t, Q_Σ)); межу допустимого перепаду температур $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$ (графік $(t, (\theta_1 - \theta_2)_{max})$). Вертикальна зелена пунктирна лінія позначає час закінчення перехідного процесу.

Точна модель забезпечує підвищення ефективності керування, швидкості нагрівання, дозволяє зменшити витрати палива. При цьому дотримуються задані обмеження на швидкість нагрівання, що дозволяє мінімізувати обсяги браку.

Неточність моделі призводить до збільшення перепаду температур у гарячій заготовці (зі значним порушенням обмежень), збільшує тривалість перехідного процесу і сумарну витрату пального порівняно з керуванням за наявності точної моделі.

Досліджено вплив вагового коефіцієнта w^u на показники якості керування в межах $w^u \in [0; 0,3]$. Залежність показників якості від w^u для різних обмежень на $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$ наведено на рис. 3–7. Кольорова шкала вказує на значення $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$, якому відповідає дана крива.

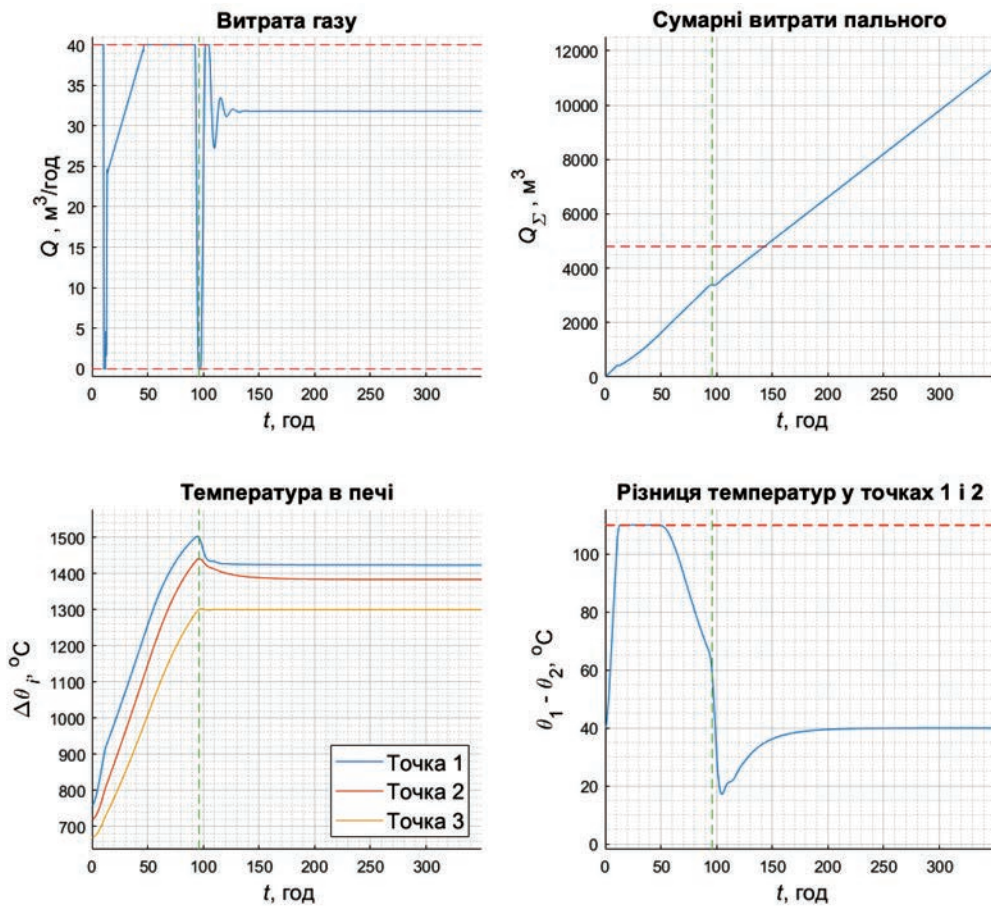


Рис. 1. Перехідний процес з точною моделлю

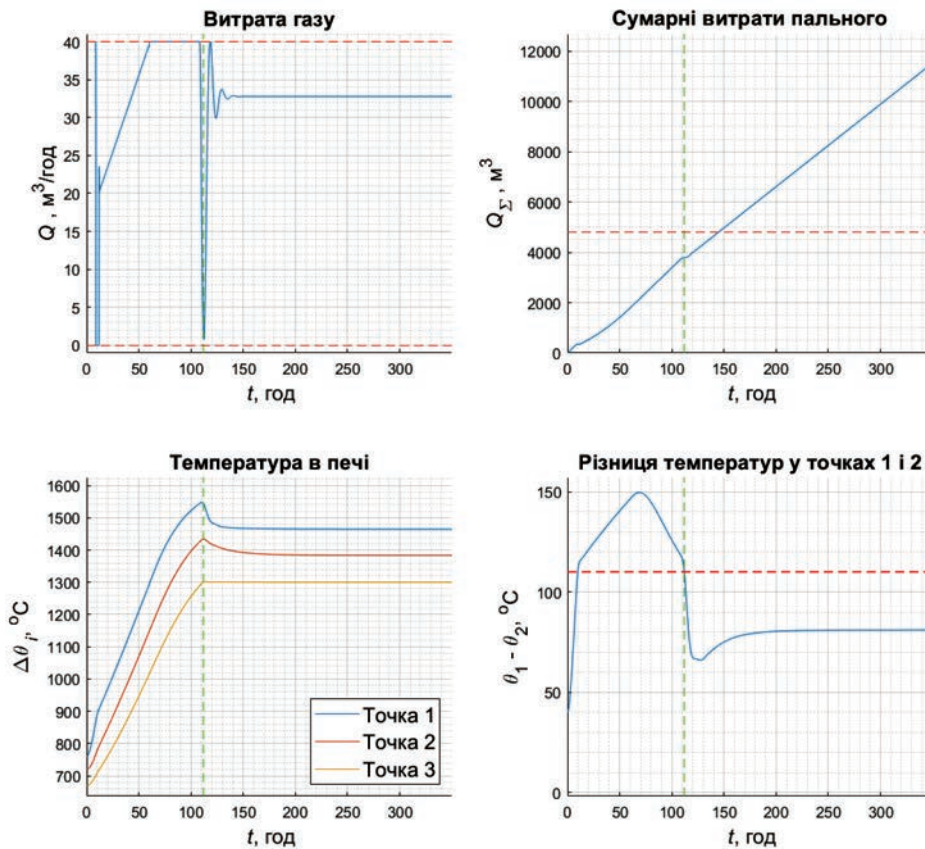


Рис. 2. Перехідний процес із неточною моделлю

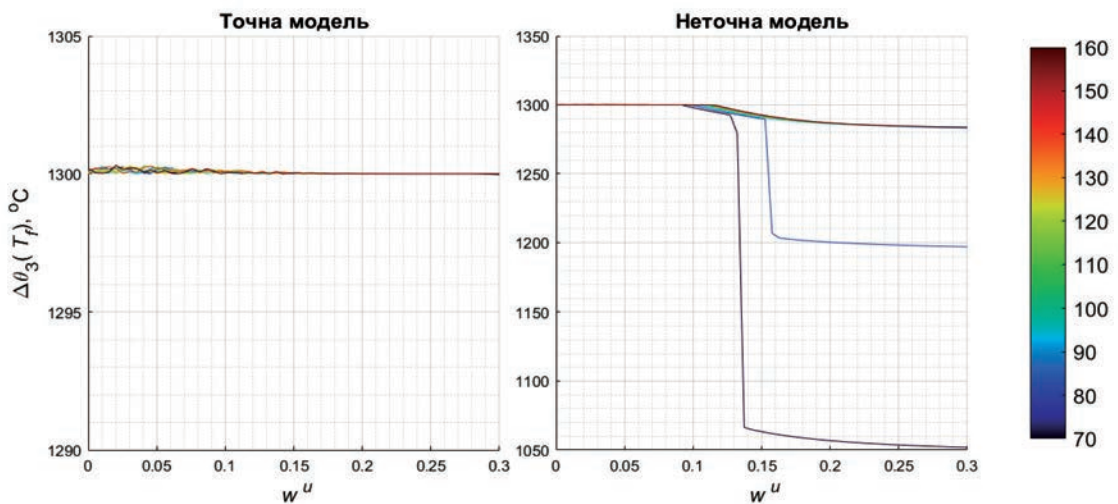


Рис. 3. Кінцева температура точки 3 як функція w^u

З рис. 3 видно, що w^u практично не впливає на кінцеву температуру точки 3 у випадку точної моделі. Шуми на початковій ділянці можна пояснити способом обчислення тривалості перехідного процесу. Такий шум наявний і в неточній моделі, однак є непомітним через менший масштаб. Різде зниження кінцевої температури з неточною моделлю зі збільшенням w^u спричи-

нене неможливістю досягнути значення завдання за відведений час.

Фактичний максимальний перепад температур (рис. 4) та його вихід за максимально допустиму межу (рис. 5) свідчать про дотримання обмежень, навіть із недосягненням порогового значення на рівнях 150 і 160 $^\circ\text{C}$. Для неточних моделей наявне суттєве перевищення обмеження, і тим більше,

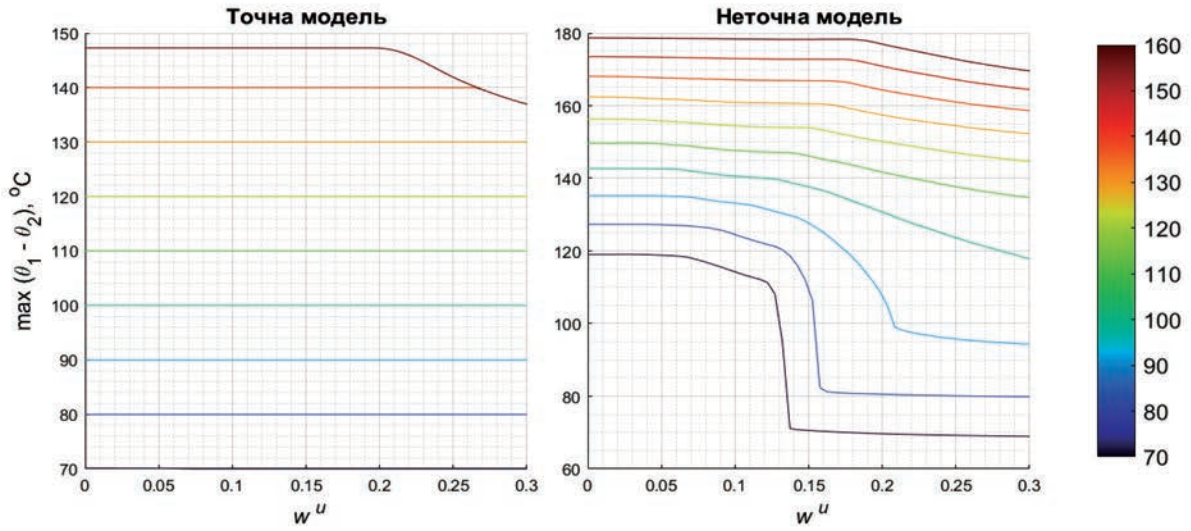


Рис. 4. Максимальна різниця температур точок 1 і 2 як функція w^u

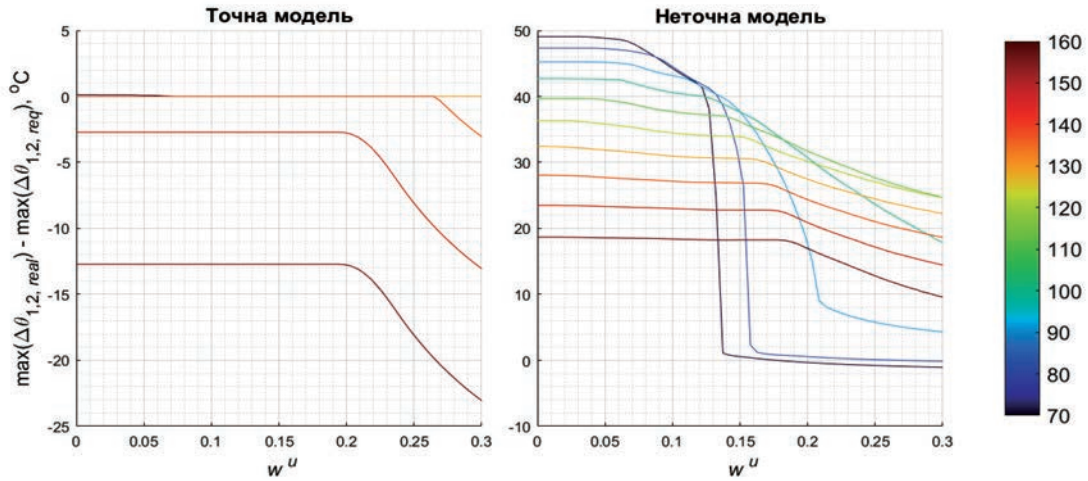


Рис. 5. Різниця допустимої та фактичної максимальних різниць температур точок 1 і 2 як функція w^u

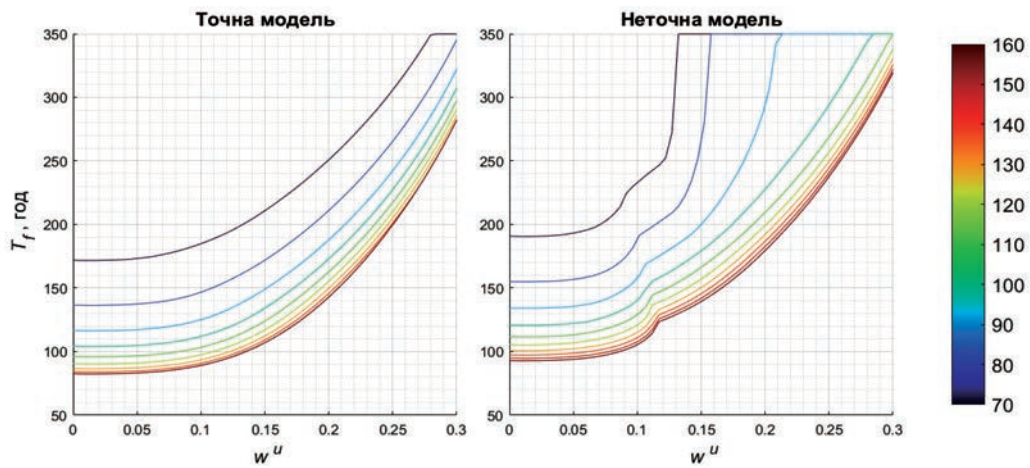


Рис. 6. Тривалість перехідного процесу як функція w^u

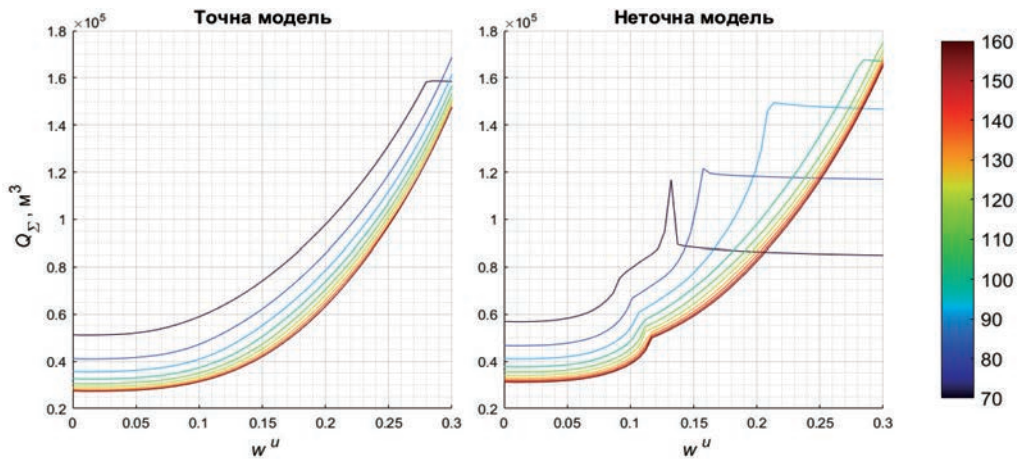


Рис. 7. Сумарна витрата палива як функція w^u

чим меншим є порогове значення. Зміна w^u не дає практично корисних результатів.

Тривалість перехідного процесу (рис. 6) і сумарна витрата палива (рис. 7) збільшуються разом із w^u , що свідчить про недоцільність використання w^u як параметра налаштування в даному випадку. Це також дає опосередковані докази доцільності використання критерію мінімальної швидкодії як рівнозначного критерію мінімальної витрати палива.

На рис. 8 показані графіки зменшення тривалості процесу (враховано лише нагрівання) й витрат палива за цей процес відносного до регламентних (стала витрата газу $Q = 30 \text{ м}^3$, $T_f = 160$ год), де за аргумент узято максимальну допустиму різницю температур точок 1 і 2. Якщо $(\theta_1 - \theta_2)_{max} \geq 80^\circ\text{C}$, то економія часу й палива складає понад 10 % і понад 15 % відповідно. Обмеження на рівні $(\theta_1 - \theta_2)_{max} \leq 70^\circ\text{C}$ призводять до збільшення витрат палива й підвищення тривалості процесу порівняно з регламентним.

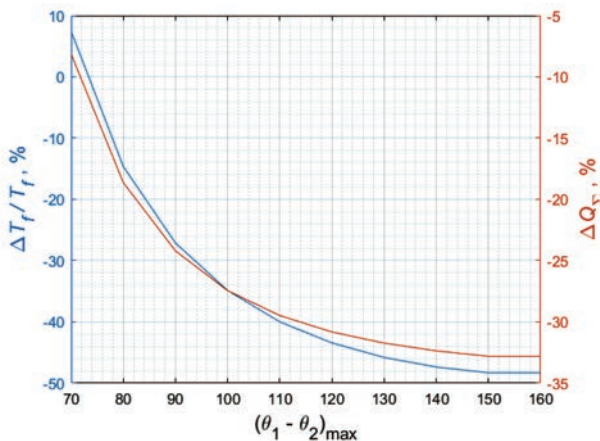


Рис. 8. Залежність відносної економії часу й палива від $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$

Для забезпечення дотримання обмежень можливо налаштувати регулятор на менший максимальний перепад температур, ніж насправді є допустимим. Наприклад, для випадку з $(\theta_1 - \theta_2)_{max} = 110^\circ\text{C}$ можна задати $(\theta_1 - \theta_2)_{max} = 70^\circ\text{C}$. Результати симуляції показано на рис. 9.

З рис. 9 видно, що навіть у цьому випадку не вдалося повністю усунути перевищення допустимого обмеження (на 5°C) попри те, що величину обмеження було зменшено на величину порушення його в початковому процесі. Це спричинено тим, що нижче порогове значення призводить до більшого порушення (рис. 5). Окрім того, тривалість процесу зросла зі 110 до 230 год (на 109 %), а витрата палива з 4000 до 6000 м^3 (на 50 %). Це доводить необхідність пошуку альтернативних способів урахування неточності моделювання для забезпечення перебігу процесу в заданих межах.

Висновки. На основі моделі було досліджено замкнену систему керування з МП-регулятором залежно від вагового коефіцієнту при величині керуючого впливу (витрати палива) в критерії оптимальності за показниками: кінцеве значення найменшої температури серед заготовок, найбільший перепад температур всередині однієї заготовки, тривалість перехідного процесу, сумарна витрата палива за перехідний процес. Показано недоцільність використання цього коефіцієнта як параметра налаштування регулятора через збільшення тривалості нагрівання та витрат палива на нього. Найкраще керування відповідає нульовому значенню вагового коефіцієнта.

Якщо модель точна, то за допустимого перепаду температур $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$ понад 80°C МП-регулятор забезпечує дотримання заданих обмежень, при цьому зменшивши тривалість перехідного процесу на 10 % і більше, і зменшивши витрати

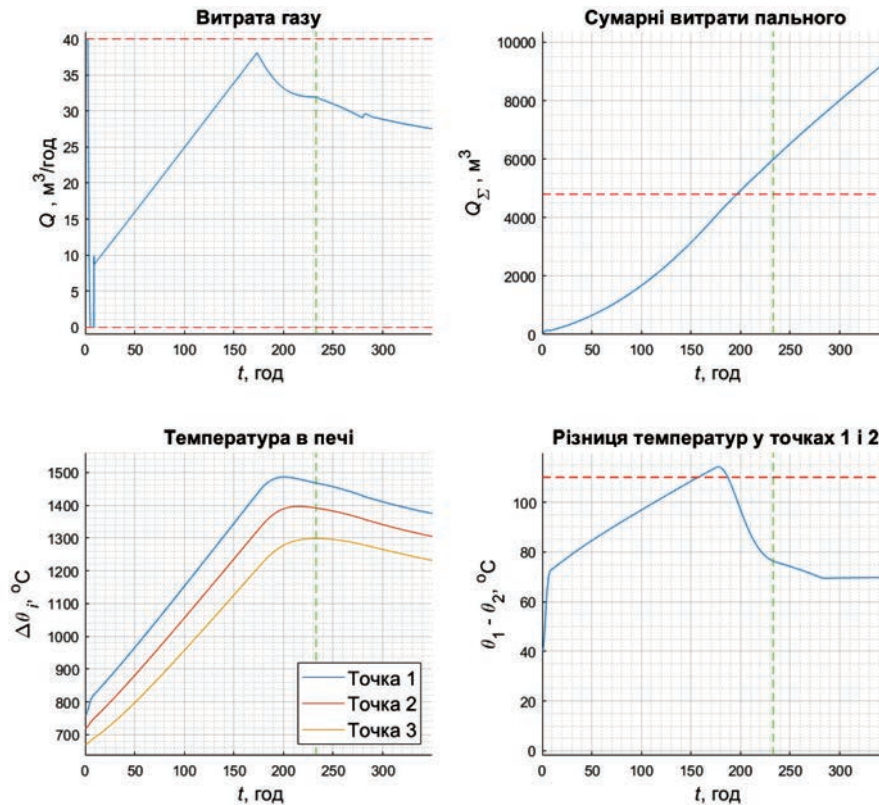


Рис. 9. Перехідний процес з меншим пороговим значенням $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$

палива на 15 % і більше (залежно від обмеження на $(\theta_1 - \theta_2)_{max}$).

Недостатньо точна модель робить якісне керування практично неможливим. Симуляція для обмеження на максимальний перепад температур у 110°C із заданим для контролера обмеженням у 70°C показала збільшення три-

валості процесу на 109 % і збільшення витрати палива на 50 %, а також порушення обмеження на 5°C проти 40°C , які були зафіксовані раніше. Це доводить необхідність пошуку інших способів пом'якшення негативного впливу неточності моделі на якість керування, що і є предметом подальших досліджень.

Список літератури:

1. Коротинський А.П., Жученко О.А. Постановка задачі керування процесом випалювання у виробництві вуглецевих виробів. *Гірничий вісник*. 2017. № 102. С. 174–179.
2. Жученко О. А. Система керування вуглеграфітовим виробництвом. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. № 1. С. 72–78.
3. Жученко Л.К. Постановка задачі оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. № 5. С. 81–85.
4. Жученко А. І., Путятін Р. О. Задача керування процесом випалювання вуглецевих виробів. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2023. № 4. С. 32–34.
5. Жученко А. І., Коржик М. В., Кутузов С. В. Керування процесом графітації при виробництві електродної продукції: монографія / НТУУ «КПІ», Вид. дім «Києво-Могилянська академія», Київ, 2013. С. 201–217.
6. Коротинський А.П. Автоматизація процесу керування багатокамерними печами випалювання вуглеграфітових виробів: дис. докт. філософії: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ, 2020. 190 с.
7. Жученко О. А. Метод спрощення математичних моделей об'єктів керування із розподіленими параметрами. *Міжнародний науково-виробничий журнал «Автоматизація технологічних і бізнеспроцесів»* 2015. С. 15–25.
8. Zhuchenko O., Korotynskiy A. Investigation influence of predict gorizont of mpc-regulator for control of the baking process. *Slovak international scientific journal*. 2020. VOL. 2. № 37.
9. Model Predictive Control Toolbox Documentation: веб-сайт. URL: <https://www.mathworks.com/help/releases/R2021a/mpc/index.html> (дата звернення: 13.09.2023).

Zhuchenko A.I., Putiatin R.O. INVESTIGATION OF MODEL-PREDICTIVE CONTROL OF THE FIRING PROCESS OF CARBON GRAPHITE PRODUCTS WITH REGARD TO MODEL INACCURACY

The efficiency of the model-predictive control system for the burning process of carbon products was investigated when using both accurate (in a certain sense) and inaccurate mathematical models. The following were considered as indicators of control efficiency: the final temperature value in the billet with the lowest temperature, the largest temperature difference in the billet with the highest temperature, the duration of the burning transient, and the total fuel consumption during the transient.

Given that the objective of this study was to analyze not so much absolute values as trends in changes in control performance indicators when the parameters of the mathematical model used in the control system deviate from their nominal values, second-order aperiodic links for all studied channels were considered as models. The numerical values of the mathematical models were identified from the experimental data.

The article presents the results of a study of the impact of changes in each of the parameters of mathematical models (transmission coefficients, time constants) on control efficiency. These results are qualitative in nature, i.e., they show whether an increase (decrease) in a given parameter contributes (does not contribute) to control efficiency.

The peculiarities of the model-predictive control system in terms of using accurate and inaccurate mathematical models are investigated. The conditions for determining the duration of transient processes are formulated.

The precise mathematical model improves control efficiency and heating speed and reduces fuel consumption. At the same time, the set limits on the heating rate are observed, which minimizes the amount of rejects.

The inaccuracy of the model leads to an increase in the temperature difference in the hot workpiece (with a significant violation of the constraints), increases the duration of the transient process and the total fuel consumption compared to the control based on an accurate model.

The necessity of finding alternative ways to take into account the inaccuracies of mathematical models used in the system of modeling and forecasting control of the process of burning carbon products to ensure the process within the specified technological limits is shown.

Key words: control efficiency, MP controller, inaccurate model, control quality, burning, carbon graphite products.