

УДК 681.515.013:66.046.4

ПУТЯТИН Р. О. *, ЖУЧЕНКО А. І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО МП-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ЗАГОТОВОК ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ВИРОБІВ

Модельнопрогнозний регулятор забезпечує кращу якість керування технологічним процесом випалювання заготовок вуглеграфітових виробів порівняно з ПІД-регулятором і його варіаціями. Його вада — чутливість до похибок моделювання об'єкта. За одночасної зміни усіх параметрів об'єкта в несприятливий бік усього на 3 % керування модельнопрогнозного регулятора стає незадовільним.

У дослідженні синтезовано адаптивний модельнопрогнозний регулятор для керування процесом випалювання. Для ідентифікації моделі камери «під вогнем» у реальному часі використано рекурсивний алгоритм найменших квадратів із забуванням; показник забування становить 0,98. Порівняно роботу звичайного й адаптивного модельнопрогнозного регуляторів за точної моделі, за несприятливих відхилів параметрів стаціонарного об'єкта від параметрів моделі, за сприятливих відхилів, а також за нестационарного об'єкта, параметри якого змінюються східчасто. В усіх випадках адаптивний регулятор забезпечує дотримання перепаду температури в найгарячішій («найнебезпечнішій») заготовці в заданих межах, 90 °С, і навіть дає «запас» за цим перепадом (від 0,8 % до 8 %). Однак він робить випалювання тривалішим (від 4,8 % до 142,1 %) і витратнішим із погляду палива (від 1,2 % до 106,2 %), ніж у разі використання неадаптивного регулятора, навіть тоді, коли останній забезпечує дотримання обмежень. Загалом доцільно використовувати адаптивний модельнопрогнозний регулятор. Потрібно дослідити економічні межі такої доцільності, а також порівняти різні методи ідентифікації, щоби підвищити швидкодію.

Ключові слова: МП-регулятор, адаптивне керування, оптимальне керування, ідентифікація, випалювання, вуглеграфітові вироби, енергоефективність

DOI: 10.20535/2617-9741.3.2024.312422

*Corresponding author: redrih2013@gmail.com

Received 28 August 2024; Accepted 05 September 2024

Постановка проблеми. Випалювання заготовок вуглеграфітових виробів — передостанній етап їх виготовлення, що передусє графітуванню, і разом із ним — один із найбільш часо- й енерговитратних процесів усього вуглеграфітового виробництва. З одного боку, випалювання потрібно прискорювати, адже що воно триваліше, то дорожче. З іншого ж боку, є певне обмеження (на ділі точно не відоме) на швидкість нагрівання, за порушення якого принаймні одна заготовка трісне та стане непридатною.

Випалювання зазвичай триває понад тиждень, а дізнатися про бракованість виробів можна лише по закінченню процесу. Через це надзвичайно важливо не лише розробити правильний технологічний регламент випалювання, але й автоматичну систему керування, здатну забезпечити дотримання останнього. Найцікавіша з цього погляду частина печі — камера «під вогнем» (в якій згоряє паливо), адже перепади температур у заготовках найбільші саме там.

Задача автоматичного керування випалюванням вуглеграфітових заготовок потребує розв'язання двох питань: моделювання процесу випалювання й синтезу відповідного регулятора.

До моделювання можна підходити по-різному, але в будь-якому разі потрібно брати до уваги неточність моделі під час синтезу регулятора. Практична непередбачуваність відхилення від моделі та сильний вплив останнього на можливість дотримуватися регламенту — підстави, щоби використати адаптивний регулятор. Враховуючи хороші висліди, отримані раніше з модельнопрогнозним регулятором (МНР) на комп'ютерних моделях, вважаємо за доцільне використати адаптивний МП-регулятор. Його можливість до пристосування полягає в ідентифікації моделі об'єкта в реальному часі.

Для синтезу потрібно мати початкову модель і метод її пристосування до зібраних впродовж керування даних методами ідентифікації в реальному часі.

Аналіз попередніх досліджень. Процес випалювання моделюють як із урахуванням його розподіленості, так і спрощено.

Для моделювання розподілених систем є два підходи.

Перший підхід полягає в складанні системи алгебричних і диференціальних рівнянь, яка описує систему відповідно до прийнятих припущень, і подальшому розв'язанні її числовими методами. Цей підхід застосовують для загального дослідження процесу та визначення найкращого технологічного регламенту, як, наприклад, у [1, 2, 3, 4].

Другий підхід — використовувати спрощену модель, вибравши її структуру й ідентифікувавши невідомі величини (числа й залежності) за дослідними даними. Основні структури ідентифікованої моделі: лінійна стаціонарна система 2-го порядку (передавальна функція, різницеве рівняння тощо) [6]; модель на основі розкладу на ортогональні функції (обмеження узагальненого ряду Фур'є) [2, 7, 8, 9].

Питання автоматичного керування процесом випалювання за допомогою МП-регулятора порушували переважно сучасні автори. В [2] показано переваги керування МП-регулятором порівняно зі звичайним і вибіркоким («селективним») ПД-регуляторами. В [2, 6] досліджено також вплив обрїю («горизонту») передбачення й обрїю керування. Виявлено загальне покращення від збільшення обрїю передбачення й обрїю керування. В [6] також показано, що навіть за невеликого (3 %) відхилу параметрів моделі, використаної в регуляторі, в «несприятливий» бік від параметрів моделі, яку використовували для моделювання «дійсного» об'єкта, якість керування стає незадовільною. Нерозв'язана частина наукового питання — якісне керування незалежно від точності початкової спрощеної моделі процесу.

Класичні методи ідентифікації систем, які ми використовуватимемо, вже добре відомі й висвітлені в підручниках із цього предмету. Щодо математичних подробиць посилатимемося на книжку [10].

Мета статті — синтезувати адаптивний МП-регулятор для керування температурою в процесі випалювання заготовок вуглеграфітових виробів у камері «під вогнем»; дослідити його можливості на комп'ютерній моделі та порівняти з неадаптивним МП-регулятором.

Виклад основного матеріалу. Задачу оптимізації для МП-регулятора в даному процесі описано в [5]. Початково модель (передавальну функцію неперервної системи 2-го порядку), яку будемо уточнювати за даними процесу керування, така сама, як у [6]. Для керування використано дані про температуру в трьох точках печі: найгарячіша точка найгарячішої заготовки («точка 1»), найхолодніша точка найгарячішої заготовки («точка 2»), найхолодніша точка найхолоднішої заготовки («точка 3»). Крім того, через те що для ідентифікації моделі за «нульову» температуру для j -ої точки взято її початкову температуру в камері «під вогнем» $\Delta\theta_j$, то значення керувального впливу (витрати палива) — це його відхил від деякого «нульового» значення, яке в поточній роботі не важливе. Задля стислості слово «відхил» надалі пропускатимемо.

Згідно з [1], процеси, що відбуваються в печі випалювання, нестаціонарні. З огляду на це ми вибрали рекурсивний метод найменших квадратів із забуванням, описаний у [10]. Попри те, що за своєю природою він має нескінченний обрїю, показникове (експоненційне) меншання впливу старих даних із часом завдяки «забуванню» робить його придатним для нашої задачі. Ще одна перевага методу в тому, що він не потребує ніяких вхідних даних крім самої моделі та її стану в початкову мить. Ми використали типове значення показника забування, 0,98 [10].

Щоб дискретна модель у просторі станів, яку використовує МП-регулятор, була ідентифікованою (її параметри можна було визначити однозначно), цю модель (для кожної точки окремо) потрібно звести до канонічного вигляду [10]. Отже, модель динаміки температури в усіх трьох точках матиме такий вигляд:

$$\begin{pmatrix} \Delta\theta_{1,1}(t+1) \\ \Delta\theta_{1,2}(t+1) \\ \Delta\theta_{2,1}(t+1) \\ \Delta\theta_{2,2}(t+1) \\ \Delta\theta_{3,1}(t+1) \\ \Delta\theta_{3,2}(t+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{1,1} & a_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{2,1} & a_{2,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{3,1} & a_{3,2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\theta_{1,1}(t) \\ \Delta\theta_{1,2}(t) \\ \Delta\theta_{2,1}(t) \\ \Delta\theta_{2,2}(t) \\ \Delta\theta_{3,1}(t) \\ \Delta\theta_{3,2}(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{1,1} \\ b_{1,2} \\ b_{2,1} \\ b_{2,2} \\ b_{3,1} \\ b_{3,2} \end{pmatrix} \Delta u(k),$$

де перший показчик при сучинниках (коефіцієнтах) вказує на номер точки, а другий — на номер величини (змінної стану або елемента матриці стану або матриці керування) для цієї точки. Всі «буквенні» елементи матриць стану й керування буде налаштовувати впродовж роботи системи.

В Матлабі алгоритми ідентифікації в реальному часі не підтримують модель у просторі станів, натомість потрібно використовувати авторегресійну модель із зовнішнім входом, АЗоВ (англ. *autoregressive exogeneous model*, ARX), втілену в об'єкті *recursiveARX*. Модель для температури в j -ій точці печі, записана через сучинники матриць стану й керування, матиме такий вигляд:

$$\Delta\theta_{j,1}(t+1) - a_{j,2}\Delta\theta_{j,1}(t) - a_{j,1}\Delta\theta_{j,1}(t-1) = b_{j,1}\Delta u(t) + (b_{j,2} - a_{j,2}b_{j,1}) \cdot \Delta u(t-1).$$

Літера t в обох рівняннях позначає дискретний час.

На кожному кроці алгоритм уточнює модель у вигляді АЗoВ, а потім за нею оновлює модель у просторі станів, яку використовує регулятор.

Щоби порівняти якість керування неадаптивним і адаптивним МПР, змодельовано такі процеси:

1. Процес, у якому об'єкт стаціонарний, а модель, яку використано в регуляторі, точна.
2. Процес, у якому об'єкт стаціонарний, але модель у регуляторі неточна. Для об'єкта, підсилення точки 1 K_1 і сталі часу точки 2 T_2 й точки 3 T_3 збільшено на 3 % порівняно з такими в моделі, а підсилення точки 2 K_2 та точки 3 K_3 та сталі часу точки 1 T_1 зменшено на 3 %. Зміна кожного параметру об'єкта несприятлива для керування процесом випалювання [6].
3. Процес, аналогічний до процесу 2, але всі параметри об'єкта змінено на 3 % у сприятливий бік.
4. Процес, у якому об'єкт нестаціонарний. Спершу об'єкт відповідає моделі, але після 15 год значення його параметрів (підсилення та сталі часу) починають східчасто змінюватися раз на 40 год на 3 % як у несприятливий, так й у сприятливий бік. Графіки зміни параметрів об'єкта наведено на рис. 1.

В усіх процесах різниця температур обмежена зверху значенням 90 °С (м'які обмеження), а відхил керування обмежений проміжком від 0 до 40 м³/год (жорсткі обмеження). Функція мети регулятора така:

$$\begin{cases} J(z_k) = \sum_{i=1}^{400} \left(\left[1 - \frac{\Delta\theta_3((k-1) \cdot p + i)}{630} \right]^2 + 10^6 \cdot \varepsilon^2 \right) \\ 0 \leq u(i) \leq 40, \quad 1 \leq i \leq 400 \\ \theta_1(i) - \theta_2(i) \leq 90 + 0,05 \cdot \varepsilon, \quad 1 \leq i \leq 400 \end{cases}$$

де k — номер поточного проміжку прогнозування, p — його тривалість у часовий кроках, а i — номер поточного часового кроку, $\Delta\theta_3$ — відхил температури в точці 3 від її початкового значення, ε — допоміжна змінна для врахування міри порушення м'яких обмежень, а z_k — вектор керування в поточному обрїї, поповнений допоміжною змінною ε . Напряму величину керування $u(t)$ в меті не враховано (крім обмежень на нього), бо інакше тривалість процесу та, як наслідок, загальна витрата палива більшає [6]. Часовий крок становить 0,1 год, обрїї передбачення — 40 кроків (4 год), обрїї керування — 10 кроків (1 год).

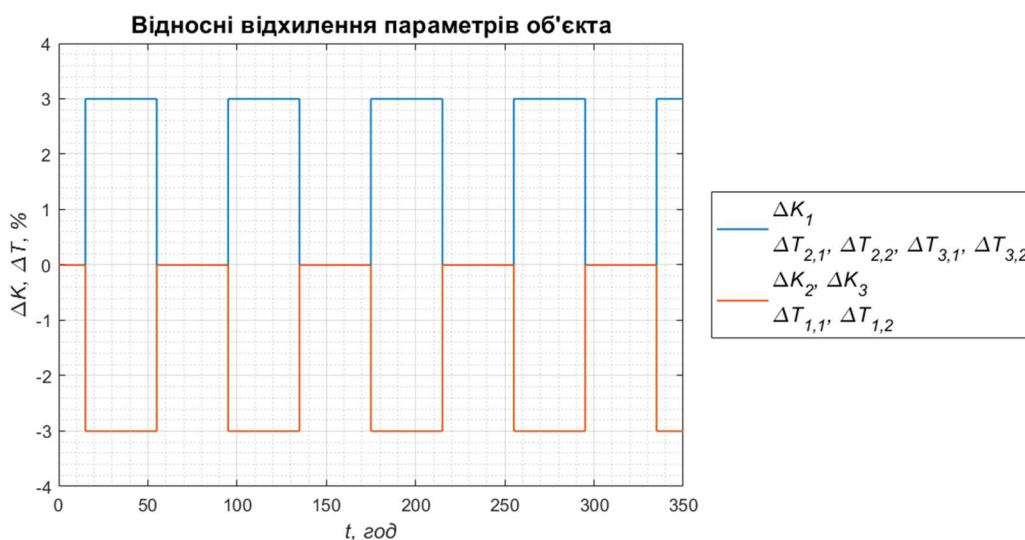


Рис. 1 — Зміна параметрів об'єкта з часом

Перехідні процеси для обох регуляторів у разі точної моделі (процес № 1) зображено на Рис. 2. Тут і надалі зображено не відхили температури, а її безвідносне (абсолютне) значення. З графіків для неадаптивного (МПР) й адаптивного (АМПР) модельнопрогнозних регуляторів видно, що обидва забезпечують якісний перехідний процес: обмежень на різницю температур між точками 1 і 2 дотримано. Процес для АМПР триваліший на 9 год (7,7 %), має на 129 м³ (3,6 %) більшу загальну витрату палива, а також на 4,6 °С (5,2 %) меншу різницю температур між точками 1 і 2, ніж задано в обмеженнях. В разі МПР найбільша різниця температур точно дорівнює обмеженню (90 °С).

Числові значення для цього й наступних процесів наведено в Таблиця 1. Тривалість процесу й загальну витрату палива ми округлили вгору до цілих, а різницю температур і відносне порушення обмеження на неї — до десятих. Від’ємні значення в рядку «Найбільше перевищення обмеження» вказують на наявність «запасу» для різниці температур ($\theta_1 - \theta_2$). Крім того, для тривалості процесу й витрати палива з адаптивним регулятором зазначено їхній відносний відхил від показників за тих самих умов зі звичайним МПР.

Зелена вертикальна штрихова лінія тут і надалі позначає час завершення перехідного процесу відповідно до спрощеної ознаки — досягнення потрібної температури в точці 3 [5, 6], а мітки на ній відповідають міткам на графіках відповідного процесу. Червоні горизонтальні штрихові лінії на графіках витрати палива й різниці температур позначають обмеження на ті величини. На графіку загальної витрати палива горизонтальна штрихова позначає загальну витрату палива в разі, якщо заготовки випалювати зі сталюю витратою палива $u = 30 \text{ м}^3/\text{год}$ (регламент, за якого отримано експериментальну модель печі).

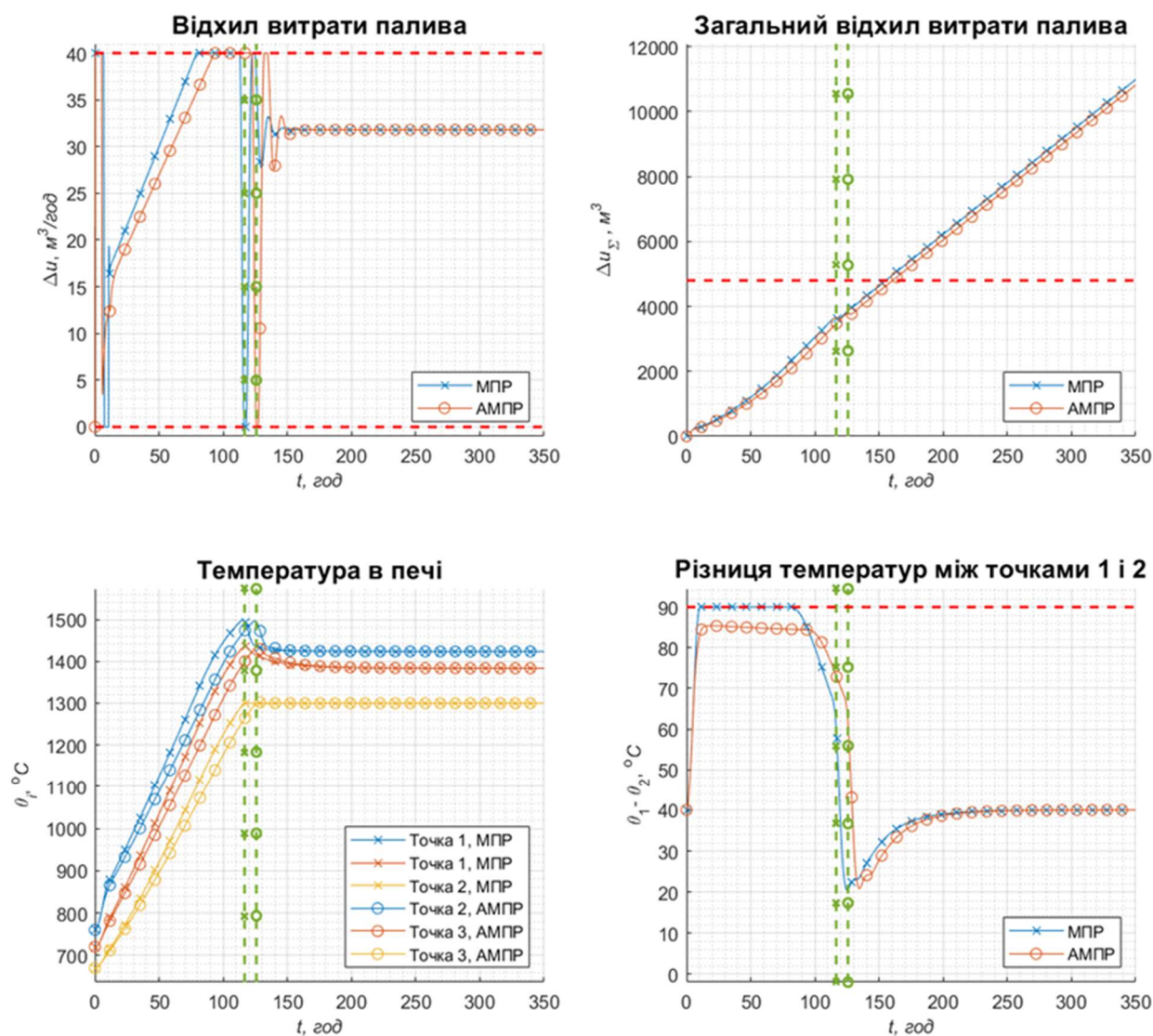


Рис. 2 — Перехідні процеси за точної моделі та стаціонарного об’єкта

На Рис. 3 наведено графіки перехідних процесів за несприятливого відхилу параметрів об'єкта (процес № 2). З рисунку бачимо, що через неможливість змінити модель для передбачення неадаптивний МПР розраховує якісно таку саму керувальну послідовність, як і для точної моделі. Внаслідок цього різниця температур між точками 1 і 2 значно, на $45,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (51 %), перевищує допустиму межу. Водночас АМПР уникає цього ціною значного, на 189 год (142,1 %), подовження перехідного процесу і, як наслідок, на 4215 м^3 (106,2 %) більшої загальної витрати палива. В останньому разі «запас» на різницю температур становить $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0,8 %).

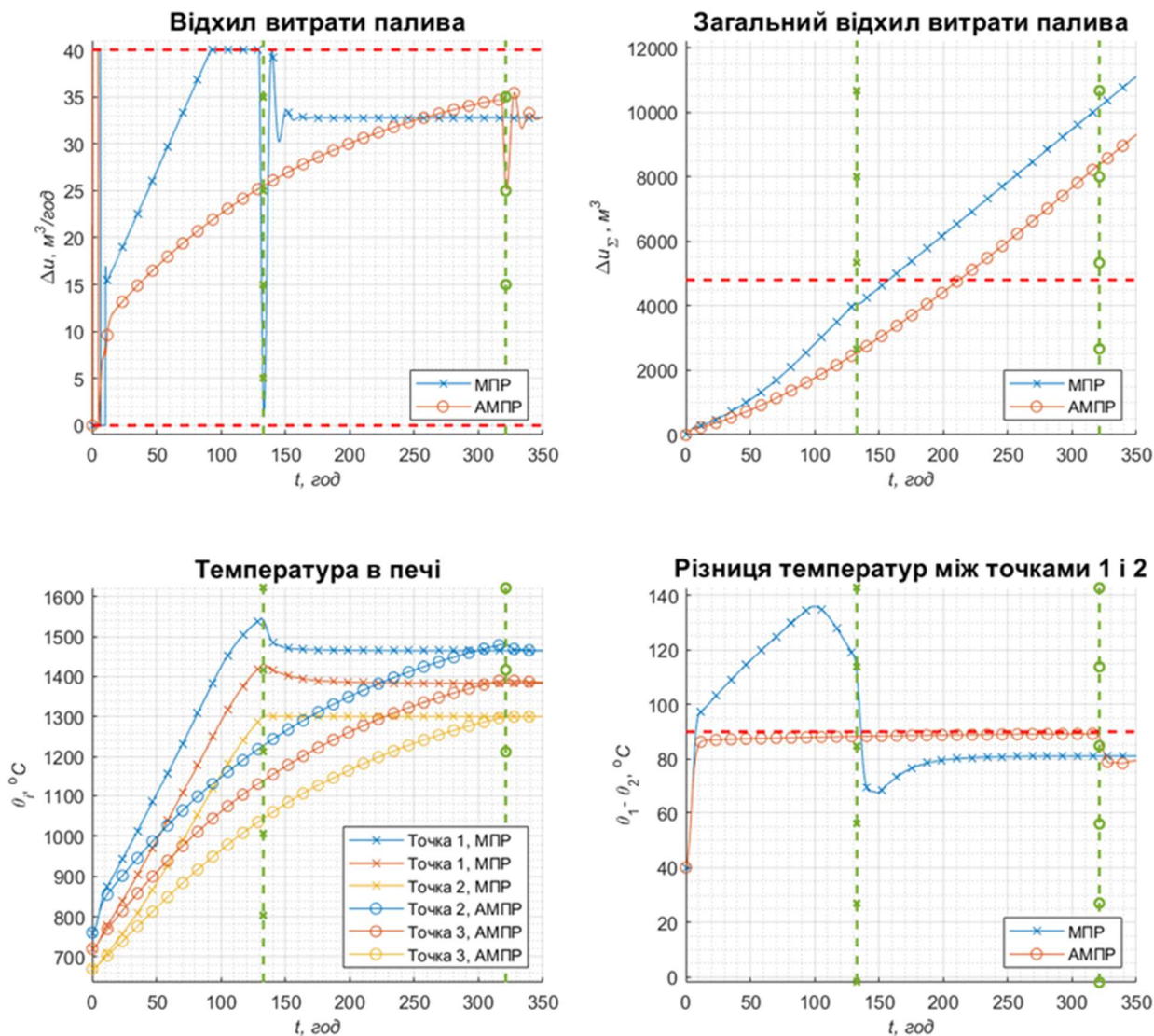


Рис. 3 — Перехідні процеси за несприятливого відхилу параметрів стаціонарного об'єкта

На Рис 4 наведено графіки перехідних процесів за сприятливого відхилу параметрів об'єкта (процес № 3). Як МПР, так й АМПР забезпечують дотримання обмежень із певним «запасом»: $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1 %) і $7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (8 %) для МПР і АМПР, відповідно. Як і в разі точної моделі, перехідний процес із АМПР довший і має більшу загальну витрату палива, хоча тут ця різниця майже непомітна: тривалість більша на 4 год (4,8 %), загальна витрата палива — на 34 м^3 (1,2 %).

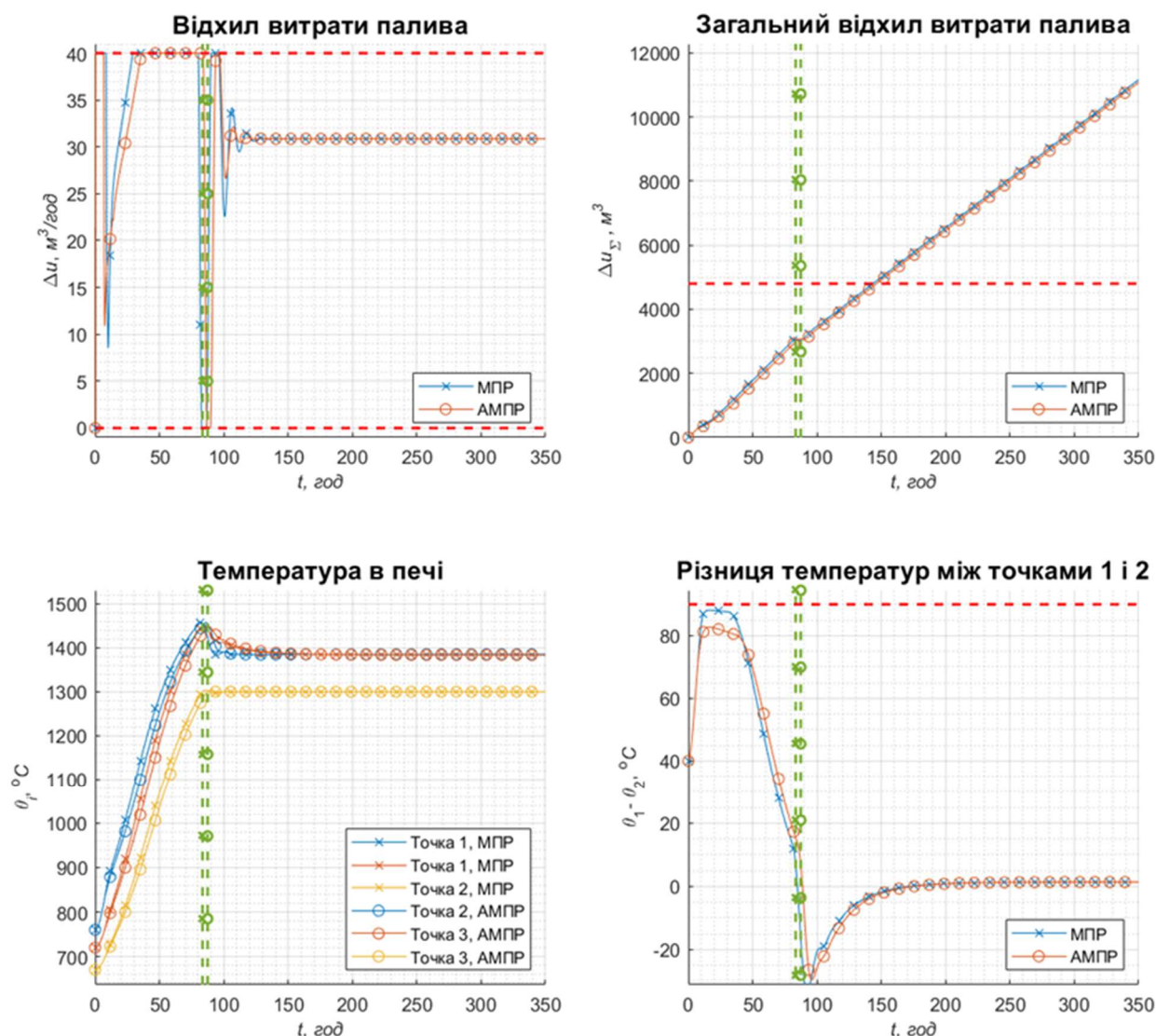


Рис 4 — Перехідні процеси за сприятливого відхилення параметрів стаціонарного об’єкта

Графіки процесів керування для нестационарного об’єкта, параметри якого змінюються відповідно до рис.1 (процес № 4), наведено на Рис. 5. Керувальний сигнал неадаптивного МПР залишився без якісних змін із тими самими наслідками для процесу, що й за несприятливих змін у процесі № 2: обмеження перевищено на 30,6 °С (34 %). Водночас АМПР пристосувався як до початкової неточності моделі, так і до її змін у несприятливий бік тоді, коли різниця температур між точками 1 і 2 близька до найбільшого допустимого значення (в середині процесу). Тривалість процесу в цьому разі більша на 42 год (32,6 %), а загальна витрата палива — на 967 м³ (25,9 %), «запас» для різниці температур становить 1,9 °С (2,2 %).

Коливання параметрів об’єкта після досягнення температурою точки 3 її усталеного значення мало впливає на цю температуру: відхили становлять до 0,5 °С (до 0,1 % проміжку від 670 °С до 1300 °С) і до 2 °С (до 0,4 % цього проміжку) для МПР і АМПР, відповідно. АМПР чутливіший до коливань, але в масштабі всього проміжку температур наслідки незначні.

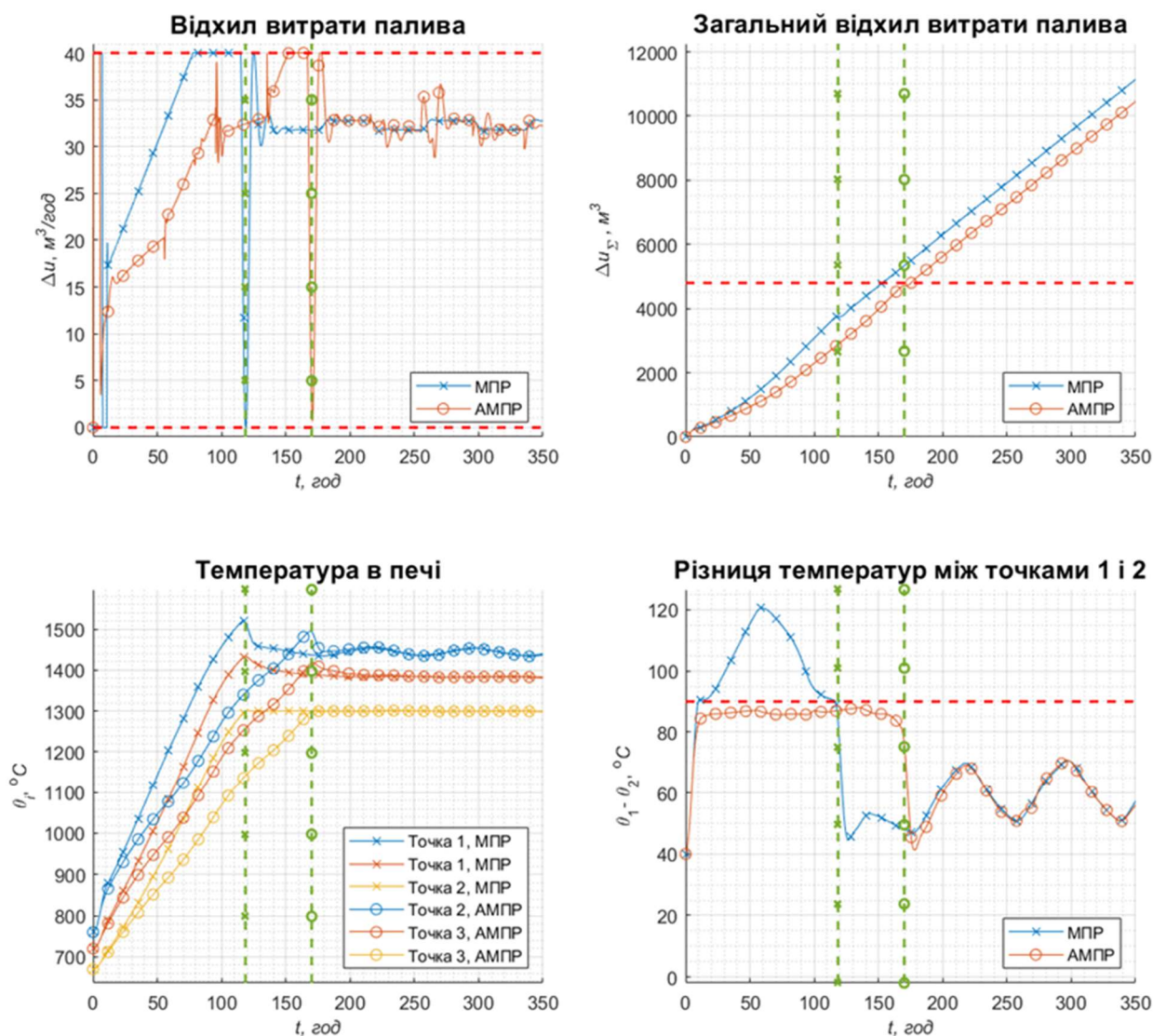


Рис. 5 — Перехідні процеси за неточної моделі та нестационарного об'єкта

Таблиця 1 — Показники перехідних процесів

№ процесу	МПР				АМПР			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Тривалість процесу, год	117	133	84	129	126 +7,7 %	322 +142,1 %	88 +4,8 %	171 +32,6 %
Загальна витрата палива, м ³	3638	4066	3036	3745	3767 +3,6 %	8381 +106,2 %	3070 +1,2 %	4712 +25,9 %
Найбільша різниця температур $\theta_1 - \theta_2$, °C	90,0	135,9	89,1	120,6	85,4	89,3	82,8	88,1
Найбільше перевищення обмеження, %	+0,0	+51,0	-1,0	+34,0	-5,2	-0,8	-8,0	-2,2

Висновки. Неадаптивний МПР забезпечує якісний процес випалювання заготовок лише в разі достатньо точної моделі, або ж у разі сприятливих відхилів параметрів об'єкта. За одночасного відхилення кожного з параметрів об'єкта лише на 3 % в несприятливий бік від параметрів моделі перепад температур усередині найгарячішої заготовки перевищує допустиме значення на більш ніж 30 %.

Адаптивний МПР із ідентифікацією за рекурсивним методом найменших квадратів із забуванням забезпечує дотримання обмежень на перепад температури в найгарячішій заготовці як за точної, так і за неточної моделі, як у разі стаціонарного, так і в разі нестаціонарного об'єкта. Найбільший перепад температур у найгарячішій заготовці в усіх дослідах трохи менший за допустиму межу.

Водночас такий АМПР схильний дуже сповільнювати процес: тривалість процесу й загальна витрата палива з ним більші за всіх досліджених умов, навіть у разі точної моделі та сприятливих відхилів параметрів стаціонарного об'єкта. В разі несприятливих змін, за яких МПР не забезпечує якісного керування, такі додаткові витрати можуть бути й цілком виправдані, хоча їхню економічну доцільність потрібно дослідити окремо. В разі сприятливих змін або точної моделі більші витрати на випалювання — це вада АМПР. З огляду на переваги АМПР, вона не критична, але спонукає шукати кращого алгоритму, щоб ідентифікувати модель печі. АМПР чутливіший до коливань параметрів об'єкта після того, як температура в точці 3 досягла усталеного значення. Ця вада незначна.

Отже, для керування процесом випалювання заготовок вуглеграфітових виробів доцільно використовувати адаптивний модельнопрогнозний регулятор.

Перспективи подальших досліджень. Дослідити вплив параметрів алгоритму ідентифікації на якість керування, порівняти рекурсивний алгоритм найменших квадратів із забуванням та інші алгоритми ідентифікації в реальному часі, щоб визначити той, що забезпечить найкраще пристосування регулятора: найменші тривалість процесу й загальну витрату палива за різних умов. Дослідити межі, в яких збільшення витрат часу й палива на випалювання економічно доцільне.

Список використаної літератури

1. Лелека, С. В. Наукові засади розробки ресурсоенергоефективних процесів та обладнання вуглеграфітового електродного виробництва : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології / Лелека Сергій Володимирович. – Київ, 2021. – 371 с.
2. Коротинський, А. П. Автоматизація процесу керування багатокамерними печами випалювання вуглеграфітових виробів : дис. ... д-ра філософії : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Коротинський Антон Петрович. – Київ, 2020. – 190 с.
3. Жученко, Л. К. Автоматизація процесів керування термічною обробкою вуглецевих матеріалів : дис. ... д-ра філософії : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Жученко Людмила Костянтинівна. – Київ, 2023. – 164 с.
4. Voloshchuk V. A., Zhuchenko L. K., Korotynskiy A. P. Research of thermal regimes of the process of burning of carbon products. Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences. 2022. No. 4. P. 72–78. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/12> (date of access: 17.06.2024).
5. Путятін, Р. О., Жученко, А. І. (2023). Задача керування процесом випалювання вуглецевих виробів. Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (4), 32–37. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2023.294325>
6. Путятін Р. О., Жученко А. І. Дослідження модельно-прогнозуючого керування процесом випалювання вуглеграфітових виробів з урахуванням неточності моделі. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Т. 74, № 1. С. 133–140. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/20> (дата звернення: 11.06.2024).
7. Жученко О. А., Цапар В. С. Метод спрощення математичних моделей об'єктів керування із розподіленими параметрами. Automation Technological and Business - Processes. 2015. Т. 21, № 21. URL: <https://doi.org/10.15673/2312-3125.21/2015.42858> (дата звернення: 17.06.2024).
8. Zhuchenko O., Korotynskiy A. Development and investigation of the reduced mathematical model of the process of baking carbon products. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 1, no. 8 (97). P. 70–78. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154840> (date of access: 27.06.2024).
9. Жученко О.А., Коротинський А.П., Хібеба М.Г. Математичне моделювання енергоємних технологічних процесів вуглеграфітового виробництва [текст] : монографія. –К.:КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 344 с.:іл. – 300 прим. ISBN 978-617-7503-56-8.
10. Ljung L. System identification: Theory for the user. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall PTR, 1999. 609 p.

Redrikh Putiatin, Anatoliy Zhuchenko

DESIGNING A MODEL PREDICTIVE CONTROLLER FOR GRAPHITE BAKING PROCESS

Model predictive controller provides better control quality for graphite products baking process than PID and its variations. The drawback of MPC is its high sensitivity to object modelling errors. If all of object parameters are varied just by 3 % simultaneously then MPC provides satisfactory control no more.

In the current paper we design an adaptive MPC for baking process control. In order to identify furnace section “under the fire” on-line, we utilize recursive least squares algorithm with forgetting factor equal to 0,98. We compare conventional and adaptive MPCs in the following cases: accurate model; undesirable deviations of object parameters from model parameters (object is time invariant); desirable deviations; time variant object with step-changing parameters. In each case adaptive MPC provides control that ensures temperature difference inside the hottest (the most “dangerous”) graphite bar to be small enough, and even gives some margin for it (0,8 % to 8 %). However, the cost for this is increased process duration (4,8 % to 142,1 %) and more fuel-consuming (1,2 % to 106,2 %) than in case of non-adaptive MPC, even if the latter provides satisfactory control as well.

In general, it is reasonable to use an adaptive MPC instead of a conventional one. Margin of economical reasonability needs further research. Also, it is necessary to compare different identification methods in order to achieve faster transition process.

Keywords: MPC, adaptive control, optimal control, identification, baking, graphite products, energy efficiency

References

1. Leleka, S. (2021). “Scientific basis for the development of resource-energy-efficient processes and equipment for carbon-graphite electrode production”, *Dissertation for Doctor of Science Degree*. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".
2. Korotynskiy, A. (2020). “Automation of the control process of multi-chamber furnaces for baking carbon products”. *Dissertation for Ph.D. degree*. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".
3. Zhuchenko, L. (2024). “Control processes automation of the carbon products heat treatment”. *Dissertation for Ph.D. degree*. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".
4. Voloshchuk, V., Zhuchenko, L. & Korotynskiy, A. (2022). “Research of thermal regimes of the process of burning of carbon products”. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. Vol. 33(72). No. 4. pp. 72–78. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/12>
5. Putiatin, R., & Zhuchenko, A. (2023). The control problem of the burning process carbonaceous products. *Bulletin of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving»*, (4), 32–37. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2023.294325>
6. Zhuchenko, A. & Putiatin, R. (2024). “Investigation of model-predictive control of the firing process of carbon graphite products with regard to model inaccuracy”. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. Vol. 35(75). No. 1. pp. 133–140. https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/1_2024/part_1/1-1_2024.pdf#page=141
7. Zhuchenko, O. & Tsapar, V. (2015). “Method for simplification of distributed control objects mathematical models”. *Automation of technological and business processes*. Vol. 7, No. 1. pp. 15–25. <https://doi.org/10.15673/2312-3125.21/2015.42858>
8. Zhuchenko O. & Korotynskiy A. (2019). “Development and investigation of the reduced mathematical model of the process of baking carbon products”. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 1, No. 8 (97). pp. 70–78. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154840>
9. Zhuchenko, O., Korotynskiy, A. & Khibeba, M. (2019). Mathematical modelling of energy-intensive technological processes of graphite production. *Igor Sikorsky Kyiv Politechnical Institute*. Kyiv. 344 p.
10. Ljung, L. (1999) System identification: Theory for the user. 2nd ed. *Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall PTR*. 609 p.