

УДК 681. 5

ЖУЧЕНКО Л. К.*
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

У статті досліджується відмовостійка система керування процесом формування вуглецевих виробів, яка синтезована як на основі традиційних відмовостійких систем для нециклічних процесів, так і систем керування з ітераційним навчанням, які продемонстрували свою ефективність при керуванні технологічними процесами циклічного характеру. Для оптимального налаштування параметрів системи керування розроблений метод, що використовує лінійні матричні нерівності.

Результати проведеного імітаційного моделювання продемонстрували, що запропонована система керування може гарантувати збіжність процесу керування до завдання як у часі, так і на кожному циклі роботи, забезпечує високу якість керування навіть в умовах дії невідомих збурень та похибок у реалізації керування регульовальними органами у разі несправностей останніх.

Ключові слова: вуглецеві вироби, відмовостійка система керування, лінійні матричні нерівності, імітаційне моделювання, ефективність керування.

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2022.260347

*Corresponding author: zhuch.l.k89@ukr.net

Received 23 May 2022; Accepted 22 June 2022

Постановка проблеми. Сучасні світові тенденції розвитку чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інших галузей промисловості обумовлюють постійне нарощування обсягів виробництва графітованих вуглецевих виробів. Графіт широко використовується як футеровочний матеріал в доменних та феросплавних печах, атомній промисловості, є незамінним в електротермії. Значним споживачем графітованих виробів є алюмінієве виробництво.

Виробництво вуглецевих виробів є у значній мірі ресурсо- та енергозатратним [1, 2]. Саме тому підвищення ефективності даного виробництва є актуальним науково-практичним завданням, особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв. Ефективним способом розв'язання даного завдання є створення сучасної системи керування технологічним процесом з урахуванням можливих відмов елементів системи.

Одним з основних технологічних процесів виробництва вуглецевих виробів є формування вуглецевих виробів, адже саме на етапі пресування електродних заготовок закладаються в основному всі спадкові властивості, що визначають якість готових виробів [3-5]. Зокрема, пресування в значній мірі визначає форму заготовки, її довжину, пористість та механічну міцність.

Формування виробів здійснюється у гідравлічних пресах одним з двох способів: 1) формуванням в закрити матрицю, 2) продавлюванням через мундштук відповідної форми. Проте спосіб з продавлюванням через мундштук має ряд переваг, він найчастіше використовується у виробництві, тому саме цей спосіб формування вуглецевих виробів розглядається у даному дослідженні.

Процес формування вуглецевих виробів складається з 3-х стадій [1, 3, 6]: завантаження, пресування та охолодження. На стадії завантаження особливо роль відіграє швидкість пресування [1, 3-6], чим і обумовлюється актуальність створення ефективної системи керування нею. Як свідчить практика експлуатації гідравлічних пресів у вуглеграфітовому виробництві [4, 5], регульовальний клапан гідравлічного пресу іноді виходить з ладу або працює з похибками. Саме тому у даній роботі розглядається стадія завантаження процесу формування вуглецевих виробів з точки зору побудови відмовостійкої системи керування швидкістю пресування.

Аналіз попередніх досліджень. Докладний аналіз існуючих систем керування процесом формування вуглецевих виробів проведений у працях [1, 3]. На жаль, у згаданих працях не розглядаються питання побудови відмовостійкої системи керування.

Питанням створення відмовостійких систем керування приділена велика увага у дослідженнях зарубіжних фахівців [7-13]. Дані дослідження присвячені неперервним технологічним процесам. У той же час у хімічній, харчовій, переробній та інших галузях промисловості широкое розповсюдження набули циклічні технологічні процеси. До циклічних технологічних процесів відноситься і процес формування вуглецевих виробів, що розглядається у даній роботі.

У згаданих вище дослідженнях, по-перше, не враховується та обставина, що циклічний процес триває певний кінцевий час і тому для досягнення бажаного результату керування може не вистачити часу. По-друге, у традиційних відмовостійких системах процес керування не використовує досвід попередніх циклів і, отже, черговий цикл не може бути покращений на підставі набутого на попередніх циклах досвіду.

У той же час високу ефективність при керуванні циклічними процесами продемонстрував метод керування з ітераційним навчанням (наприклад, [14-16]).

У статті [17] запропонована відмовостійка система керування процесом формування вуглецевих виробів.

Метою статті є розроблення методу оптимального налаштування відмовостійкої системи керування процесом формування вуглецевих виробів та дослідити її ефективність у порівнянні з традиційними відмовостійкими системами керування нециклічними процесами та системами керування з ітераційним навчанням.

Структурна схема відмовостійкої системи керування процесом формування вуглецевих виробів, що розглядається, показана на рис.1.

Сигнал керування у даній системі представляється у такому вигляді

$$u(t, k) = u_l(t, k) + u_r(t, k), \quad (1)$$

де $u_l(t, k) = u(t, k - 1) + K_{22}X_2(t + 1, k - 1)$ відповідає керуванню з ітеративним навчанням, що покращує якість роботи системи від циклу до циклу, та $u_r(t, k) = K_{21}X_2(t, k)$, яке забезпечує керування із зворотним зв'язком на протязі поточного циклу роботи.

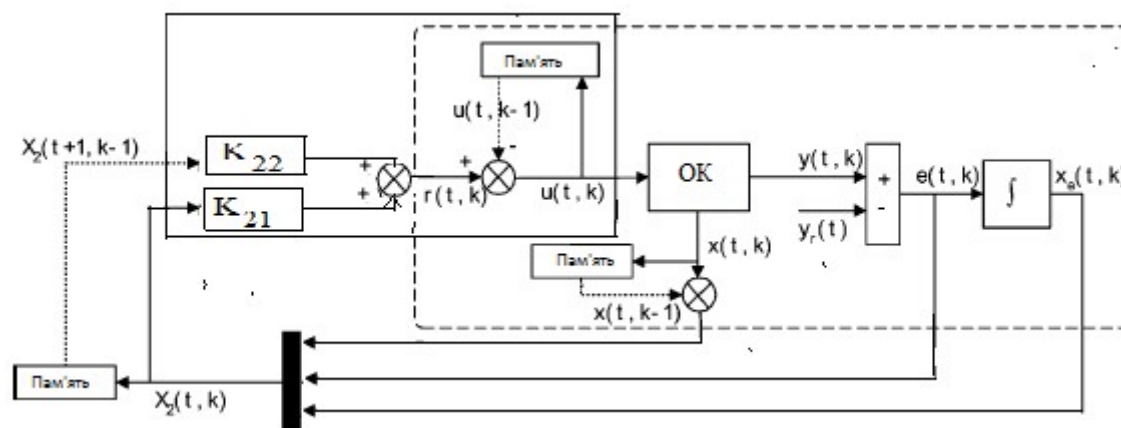


Рис. 1 – Структурна схема системи керування

Синтез системи керування здійснюється шляхом розв'язання системи лінійних матричних нерівностей

$$\begin{bmatrix} -S_1 & 0 & \Omega A_{21}^T + Y_1^T \beta B_2^T & Y_1^T \beta \\ * & -S_2 & \Omega A_{22}^T + Y_2^T \beta B_2^T & Y_2^T \beta \\ * & * & -\Omega + \varepsilon B_2 \beta_0^2 B_2^T & 0 \\ * & * & * & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} -S_1 & 0 & \Omega A_{21}^T + Y_1^T \beta B_2^T & Y_1^T \beta & \Omega G^T & 0 \\ * & -S_2 & \Omega A_{22}^T + Y_2^T \beta B_2^T & Y_2^T \beta & 0 & 0 \\ * & * & -\Omega + \varepsilon B_2 \beta_0^2 B_2^T & 0 & 0 & C_2 \\ * & * & * & -\varepsilon I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\gamma I & 0 \\ * & * & * & * & * & -\gamma I \end{bmatrix} < 0, \quad (3)$$

$$\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2 < \Omega, \quad (4)$$

якщо для даних скалярних величин $\lambda_1, \lambda_2 > 1$ існують додатно визначені матриці $\Omega, S_1, S_2 \in R^{(n+2l) \times (n+2l)}$, матриці $Y_1, Y_2 \in R^{m \times (n+2l)}$ та скаляри $\varepsilon, \gamma > 0$.

Коефіцієнти рівняння (1) визначаються таким чином

$$K_{21} = Y_1 \Omega^{-1}, K_{22} = Y_2 \Omega^{-1}. \quad (5)$$

Параметрами налаштування системи керування, що розглядається, є величини λ_1, λ_2 (характеризують процес збіжності у системі керування) та γ (визначає максимальну чутливість керованих змінних по відношенню до збурень).

Оптимізація налаштувань системи керування

Синтез системи керування передбачає максимізацію величин λ_1 та λ_2 . Ця задача може бути розв'язана декількома методами. Можна сформувані функцію якості $F(\lambda_1, \lambda_2)$ (наприклад, у вигляді

$F(\lambda_1, \lambda_2) = \left\| (\lambda_1, \lambda_2)^T \right\|$), тоді задача оптимізації виглядає таким чином :

$$F(\lambda_1, \lambda_2) \rightarrow \max_{X, S_1, S_2, Y_1, Y_2, \varepsilon, \gamma}. \quad (6)$$

При цьому обмеженнями виступають нерівності (2-4).

Задача (6) не є простою. Для спрощення даної задачі можна прийняти $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ та розв'язати наступну задачу:

$$\lambda \rightarrow \max_{X, S_1, S_2, Y_1, Y_2, \varepsilon, \gamma}, \quad (7)$$

з тими же обмеженнями, що і розглядалися вище.

Задача оптимізації параметру γ полягає у його мінімізації. Для цього треба спочатку розв'язати задачу (7), знайшовши оптимальне значення параметра λ^* , яке потім прирівняти $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda^*$ і підставити у (2, 3). Далі задача оптимізації параметру γ виглядає так:

$$\gamma \rightarrow \min_{X, S_1, S_2, Y_1, Y_2, \varepsilon}, \quad (8)$$

при обмеженнях (2) та (3). Дана задача також розв'язується засобами Matlab (LMI optimization toolbox) [18].

В результаті алгоритм оптимізації параметрів λ_1, λ_2 та γ виглядає наступним чином:

Крок 1. Розв'язати задачу (7) і знайти оптимальне λ^* .

Крок 2. Прийняти $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda^*$ та розв'язати задачу (8).

Крок 3. Використовуючи рівняння (5), визначити коефіцієнти налаштування системи керування.

Імітаційне моделювання

Для дослідження ефективності запропонованої відмовостійкої системи керування процесом формування вуглецевих виробів проведемо імітаційне моделювання. Як згадувалося вище, даний технологічний процес можна умовно поділити на 3 стадії: завантаження, безпосередньо пресування та охолодження. На стадії завантаження особливо важливу роль відіграє його швидкість. Тому у подальшому дослідженні будемо розглядати саме цю стадію процесу формування.

У результаті ідентифікації визначена модель процесу завантаження за каналом сигнал регулювального клапану – швидкість завантаження, яка у просторі станів має вигляд:

$$\begin{cases} x(t+1, k) = \begin{bmatrix} 1,582 & -0,5916 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x(t, k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t, k) + w(t, k), \\ y(t, k) = [1,69 \quad 1,419] x(t, k), 0 \leq t \leq 200, k = 1, 2, \dots \end{cases}, \quad (9)$$

де $w(t, k)$ - невідоме збурення.

Приймаємо, що початковий стан системи є $x(0, k) \equiv [0 \quad 0]^T$ для всіх k .

Припустимо, що має місце несправність регулювального органу, яка, як показано у [17], характеризується деяким параметром α .

Нехай завдання має такий вигляд

$$y_r(t) = 15 \quad (1 \leq t < 100), \quad (10)$$

$$y_r(t) = 30 \quad (100 \leq t \leq 200). \quad (11)$$

Для оцінювання якості роботи системи керування введемо такий показник

$$D(k) = \sqrt{\sum_{t=1}^{200} e^2(t, k)}, \quad (12)$$

де $e(t, k)$ – похибка керування. Зменшення $D(k)$ від циклу до циклу буде вказувати на краще відслідковування завдання.

Розглянемо роботу запропонованої системи керування для різних випадків несправностей та збурень. Вважаємо, що несправність регулювального органу має місце після 11-го циклу роботи для всіх випадків, що розглядаються.

Випадок 1. Постійно діюча несправність та повторюване збурення.

У даному випадку приймемо $\alpha \equiv 7$ та $w(t, k) = 0,1 \times [\sin(t) \quad \sin(t)]^T$.

Використаємо алгоритм пошуку з постійним кроком 0,001 для розв'язання задачі (7). Отримуємо такі результати

$$\lambda^* = 1,058,$$

$$K_{21} = [-2,1592 \quad 0,6573 \quad 0,0264 \quad 0,0264],$$

$$K_{22} = [0 \quad 0 \quad 0,2957 \quad 0].$$

Результати імітаційного моделювання з використанням розрахованих параметрів наведені на рис. 2 та 3. На рис. 2 представлені результати роботи традиційної відмовостійкої системи для нециклічних процесів (ТВСС-система) та запропонованої відмовостійкої системи для циклічних процесів (ВСЦП-система).

Як видно з отриманих результатів, оскільки збурення є повторюваним до виникнення несправності регулювального органу ТВСС-система дає повторювані результати без будь-якого покращення керування від циклу до циклу (рис. 2а). Після виникнення несправності якість відслідковування завдання знижується (рис. 2б).

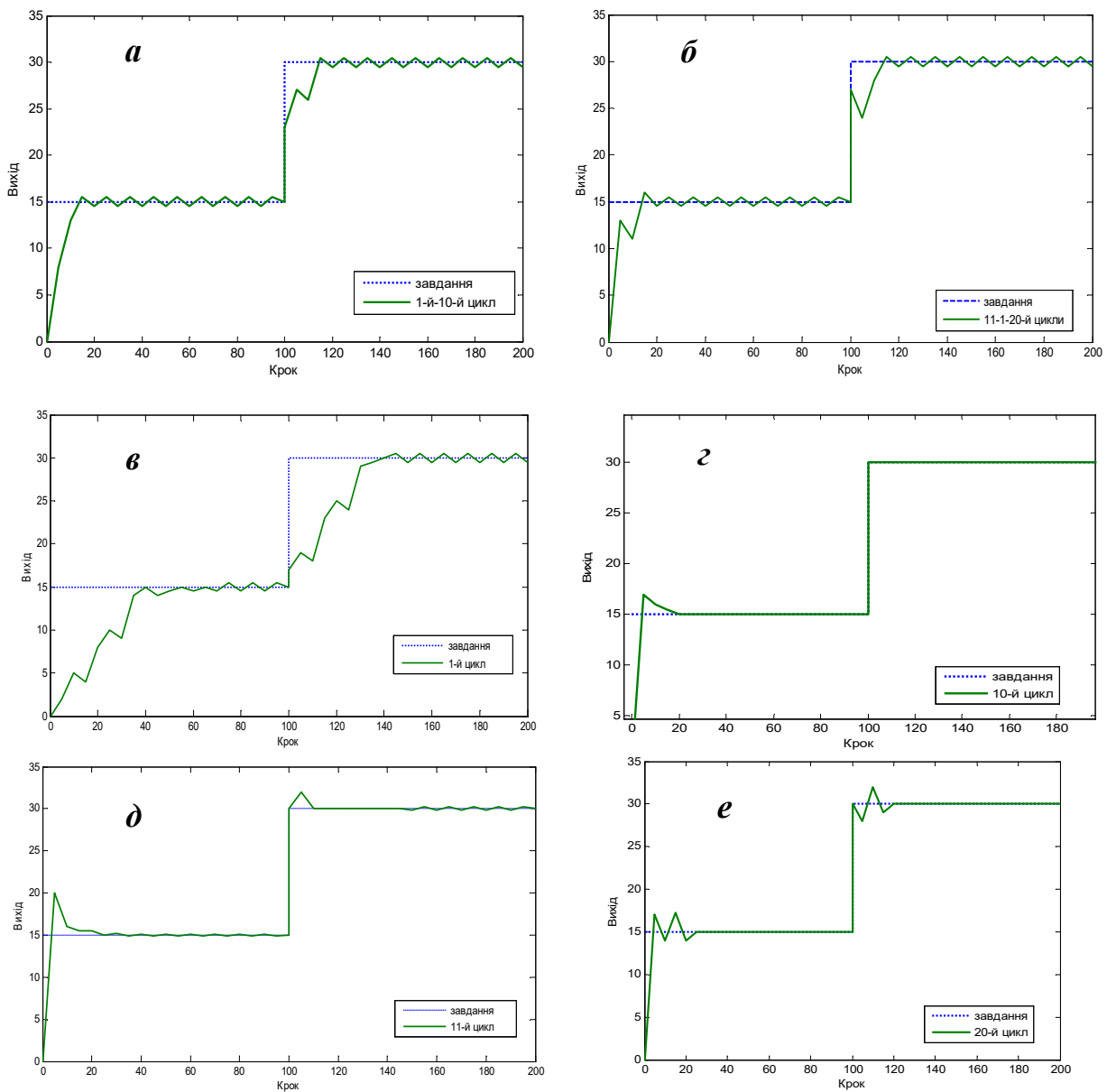


Рис. 2 – Графіки вихідних змінних (випадок 1) при використанні : а, б - ТВСС – системи; в-е – ВСЦП-системи

Результати роботи системи керування з ВСЦП – алгоритмом для 1-го , 10- го, 11-го, та 20-го циклів роботи показані відповідно на рис. 2в, 2г, 2д та 2е. Дані результати свідчать про те, що якість керування у системі з ВСЦП – алгоритмом покращується від циклу до циклу. У той же час після виникнення несправності якість керування погіршується на 11-му циклі роботи. Однак через декілька циклів вона досягає високого рівня.

На рис. 3 представлені графіки зміни показника якості керування D від циклу до циклу. З даного рисунку видно, що якість керування у ВСЦП-системі вже на 2-му циклі перевищує показники ТВСС-системи.

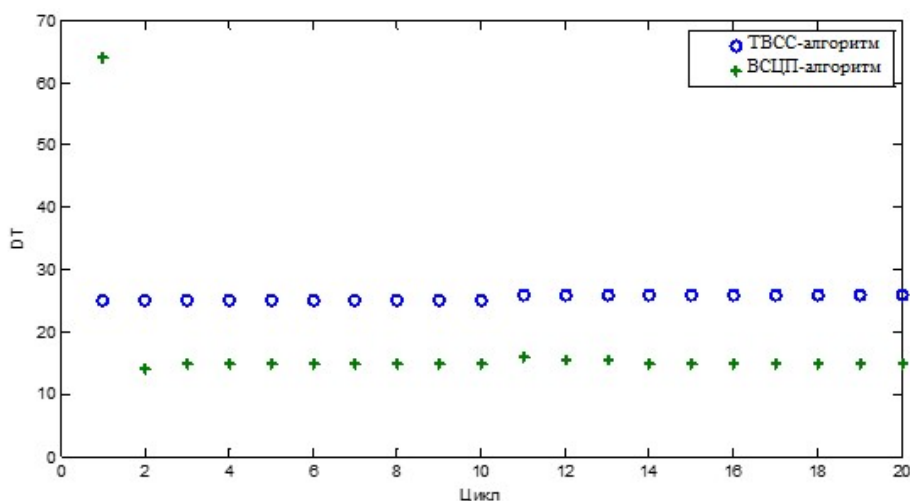


Рис. 3 – Зміна показника якості керування (випадок 1)

Випадок 2. Несправність змінюється у часі та неповторюване збурення.

Прийmemo, що

$$\alpha = 0,9 + 0,1 \sin(t),$$

$$w(t, k) = \sin(t + \varphi(k)) \times [0,1 \quad 0,1]^T,$$

де $\varphi(k)$ - випадкова величина рівномірно розподілена в інтервалі $[0, 2\pi]$.

Як і у попередньому випадку, розраховані параметри $\lambda^* = 1,058$, $\gamma^* = 5$,

$$K_{21} = [-2,1592 \quad 0,6573 \quad 0,0264 \quad 0,0264], \quad K_{22} = [0 \quad 0 \quad 0,2957 \quad 0].$$

Порівняння роботи досліджуваних систем керування наведено на рис.4.

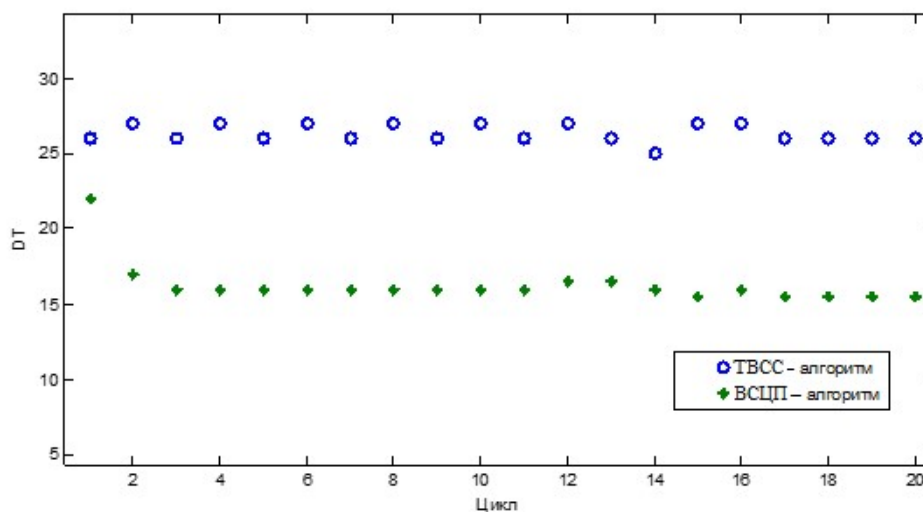


Рис. 4 – Зміна показника якості керування (випадок 2)

Як і у попередньому випадку, ВСЦП-система забезпечує покращену якість керування і у присутності змінної несправності та неповторюваних збурень.

Як свідчать результати проведеного дослідження, ТВСС-система демонструє покращення якості керування тільки у часі, тобто на протязі окремого циклу роботи. У той же час ВСЦП-система забезпечує покращення якості керування як у часі (на протязі окремого циклу роботи), так і від циклу до циклу.

Випадок 3. Порівняння ВСЦП-системи та системи керування з ітераційним навчанням (КІН-система). Нехай характеристики несправностей та збурень будуть такими, як і у випадку 1.

У даному випадку використовується КІН-система, представлена у [9]. Вибравши $\lambda = 0,5$, дістаємо $K = [-2,2349 \quad 0,5927 \quad 0,2478 \quad 0,4376]$.

Графіки вихідних змінних для циклів роботи 10 та 20 представлені на рис. 5а та 5б.

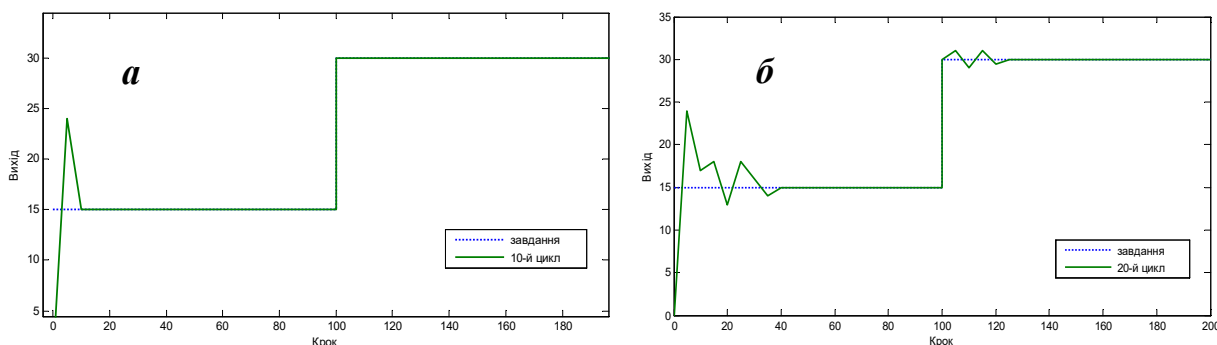


Рис. 5 – Графік вихідних змінних при використанні КІН – алгоритму: а – 10-й цикл роботи; б – 20-й цикл роботи

З рис. 5 видно, що якість керування погіршується після виникнення несправності. Це підтверджується і результатами дослідження, представленими на рис. 6.

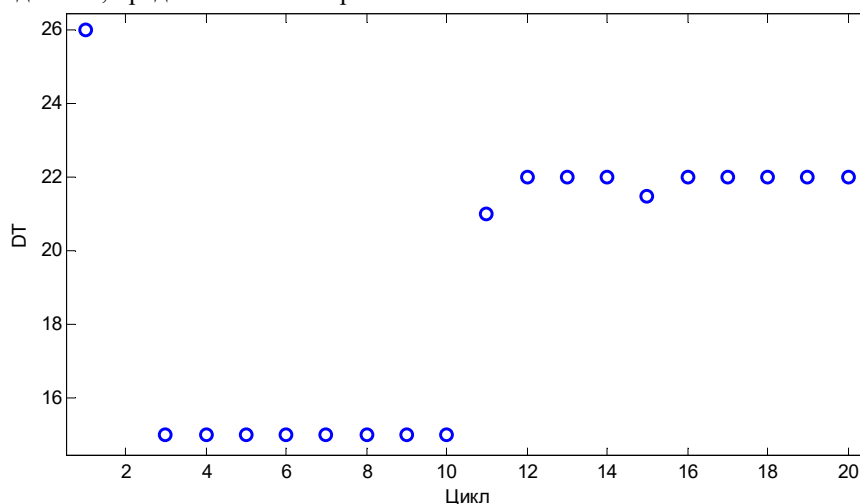


Рис. 6 – Зміна показника якості керування у КІН-системі

Вони свідчать про те, що після виникнення несправності якість керування суттєво погіршується від циклу до циклу. Таким чином, КІН – система не забезпечує потрібної якості керування при виникненні несправностей регульовальних органів.

Висновки. На основі об'єднання методу керування з ітеративним навчанням та методу керування, який враховує несправності регульовальних органів, побудована система керування процесом формування вуглецевих виробів, яка враховує як циклічний характер технологічного процесу, так і можливі несправності регульовальних органів.

Розроблений метод налаштування оптимальних значень параметрів системи керування.

Проведене дослідження ефективності системи керування шляхом порівняння її роботи із роботою традиційних відмовостійких систем та систем керування з ітераційним навчанням в умовах дії несправностей та збурень різного характеру показало, що запропонована система забезпечує покращення якості керування не тільки у часі на протязі кожного окремого циклу роботи, а й від циклу до циклу.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження мають бути направлені на практичне застосування запропонованої системи керування для різних технологічних процесів в умовах різних типів несправностей регульовальних органів та дії збурень різної природи.

Список використаної літератури

1. Карвацький А. Я. Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів [Текст] : моногр. / А. Я. Карвацький, С. М. Панов, С. В. Кутузов та ін.; К.: НТУУ «КПІ», 2012. 352 с.: іл.
2. Панов С. М., Лелека С. В., Карвацький А. Я., Мікульонок І. О. Енергоресурсоефективне пресування вуглеграфітових виробів : монографія / С. М. Панов, С. В. Лелека, А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонок.; Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 85 с.: іл. Бібліогр.: С. 77–82. 300 прим.
3. Хібеба, М. Г. Автоматизація процесу керування формуванням вуглецевих виробів : дис. ... д-ра філософії : 151- автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Хібеба Микола Григорович. Київ, 2020. 163 с.
4. Санников А. К. Производство электродной продукции [Текст]/ А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др.; М.: Металлургия, 1985. 129 с. Библиогр.: 21 назв. 1230 экз. УДК 621.3.035.2
5. Чалых Е. Ф. Оборудование электродных заводов : учеб. Пособие [для вузов] / Е. Ф. Чалых.; М. : Металлургия, 1990. 238 с.
6. Шулепов С. В. Физика углеграфитовых материалов [Текст]/ С. В. Шулепов. М-во просвещения РСФСР. Челябинск : ЧГПИ, 1968. 342 с. : граф., табл. ; 22 см.;Библиогр.: с. 319-339 (844 назв.). УДК 661.672.
7. Zhou, D. H.; Frank, P. M. Fault diagnosis and fault tolerant control. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 1998, 34 (2), 420-427.
8. Li, L.; Zhou, D. Fast and robust fault diagnosis for a class of nonlinear systems: detectability analysis. Comput. Chem. Eng. 2004, 28, 2635-2646.
9. Zhang, X.; Parisini, T.; Polycarpou, M. M. Adaptive fault-tolerant control of nonlinear uncertain systems: an information-based diagnostic approach. IEEE Trans. Autom. Control 2004, 49 (8), 1259-1274.
10. Yang, G.-H.; Wang, J. L.; Soh, Y. C. Reliable H_∞ controller design for linear systems. Automatica 2001, 37, 717-725.
11. Yang, Y.; Yang, G.-H.; Soh, Y. C. Reliable control of discretetime systems with actuator failure. IEE Proc.D: Control Theory Appl. 2000, 147 (4), 428-432.
12. Wu, H.-N.; Zhang, H.-Y. Reliable mixed L2/H fuzzy static output feedback control for nonlinear systems with sensor faults. Automatica 2005, 41, 1925-1932.
13. Scenna, N. J. Some aspects of fault diagnosis in batch processes. Reliab. Eng. Syst. Saf. 2000, 70, 95-110.
14. Gao, F.; Yang, Y.; Shao, C. Robust iterative learning control with applications to injection molding process. Chem. Eng. Sci. 2001, 56, 7025-7034.
15. Gorinevsky, D. Loop shaping for iterative control of batch processes. IEEE Control Syst. Mag. 2002, 22 (6), 55-65.
16. Xiong, Z.; Zhang, J. Product quality trajectory tracking in batch processes using iterative learning control based time-varying perturbation models. Ind. Eng. Chem. Res. 2003, 42 (26), 6802-6814.
17. Жученко Л. К. Відмовостійка система керування процесом формування вуглецевих виробів. Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (4), 22 – 29.
18. Yeong Koo Yeo. Chemical Engineering Computation with MATLAB 2nd Edition RC Press; 2nd edition (December 16, 2020). 847 p.

Liudmyla Zhuchenko

RESEARCH OF FAULT-TOLERANT CONTROL SYSTEM OF THE FORMATION PROCESS OF CARBON PRODUCTS

The production of carbon products is largely resource- and energy-intensive. That is why increasing the efficiency of this production is an urgent scientific and practical task, especially in modern conditions of constant growth of energy costs. An effective way to solve this problem is to create a modern process control system, taking into account the possible failures of system elements.

The practice of operating hydraulic presses in carbon graphite production, the control valve of the hydraulic press sometimes fails or works with errors. That is why this paper considers the stage of loading the process of forming carbon products in terms of building a fault-tolerant pressing speed control system.

The article investigates the fault-tolerant control system of carbon products, which is synthesized on the basis of traditional fault-tolerant systems for non-cyclic processes and control systems with iterative learning, which have

demonstrated their effectiveness in control technological processes of cyclical nature. A method using linear matrix inequalities has been developed for optimal adjustment of control system parameters.

Based on the combination of control with iterative learning and control that takes into account the failures of regulators, built a control system for the formation of carbon products, which takes into account both the cyclical nature of the technological process and possible failures of regulators. The research of the effectiveness of the control system by comparing its work with traditional fault-tolerant systems and control systems with iterative learning in the event of faults and disturbances of various kinds showed that the proposed system improves control quality not only over time during each cycle, but also from cycle to cycle.

Further research should be aimed at the practical application of the proposed control system for different technological processes in different types of failures of regulatory bodies and the action of disturbances of different nature.

Keywords: *fault-tolerant system, carbon products, control, control algorithm, control quality.*

References

1. Karvatskyi A. Ya. (2012). Teoretychni ta eksperymentalni doslidzhennia teploelektrychnoho ta mekhanichnoho stanu vysokotemperaturnykh ahrehativ [Theoretical and experimental studies of the thermoelectric and mechanical state of high-temperature units] / A. Ya. Karvatskyi, Ye. M. Panov, S. V. Kutuzov – K.: NTUU «KPI», – 352 p.
2. Panov E.M, Leleka S.V, Karvatsky A. Ya., Mikulyonok I.O (2020) Energy-efficient pressing of carbon graphite products: monograph / E.M Panov, S.V Leleka, A. Ya. Karvatsky, I.O. Mikulyonok. – K.: NTUU «KPI»,- 77–82 p.
3. Khibeba, M. H. (2020) Avtomatyzatsiia protsesu keruvannia formuvanniam vuhletsevykh vyrobiv [Automation of the process of controlling the formation of carbon products] : dys. ... d-ra filosofii – Kyiv, – 163 p.
4. Sannykov A. K. (1985) Proyzvodstvo elektrodnoi produktsyy [Manufacture of electrodes]/ A. K. Sannykov, A. B. Somov, V. V. Kliuchnykov – M.: Metallurhyia., – 129 p.
5. Chalykh E. F. (1990). Oborudovanye elektrodnykh zavodov. [equipment for electrode plants] / E. F. Chalykh. – M.: Metallurhyia. – 238 p.
6. Shulepov S. V. (1968) Fyzyka uhlehraytovykh materyalov [Physics of carbon-graphite materials]/ S. V. Shulepov. – M-vo prosveshcheniya RSFSR. – Cheliabynsk, - 342 p..
7. Zhou, D. H.; Frank, P. M. Fault diagnosis and fault tolerant control. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 1998, 34 (2), 420-427.
8. Li, L.; Zhou, D. (2004) Fast and robust fault diagnosis for a class of nonlinear systems: detectability analysis. Comput. Chem. Eng., 28, 2635-2646.
9. Zhang, X.; Parisini, T.; Polycarpou, M. M. Adaptive fault-tolerant control of nonlinear uncertain systems: an information-based diagnostic approach. IEEE Trans. Autom. Control 2004, 49 (8), 1259-1274.
10. Yang, G.-H.; Wang, J. L.; Soh, Y. C. (2001) Reliable H ∞ controller design for linear systems. Automatica, 37, 717-725.
11. Yang, Y.; Yang, G.-H.; Soh, Y. C. (2000) Reliable control of discretetime systems with actuator failure. IEE Proc.-D: Control Theory Appl, 147 (4), 428-432.
12. Wu, H.-N.; Zhang, H.-Y. (2005) Reliable mixed L2/H fuzzy static output feedback control for nonlinear systems with sensor faults. Automatica, 41, 1925-1932.
13. Scenna, N. J. (2000) Some aspects of fault diagnosis in batch processes. Reliab. Eng. Syst. Saf., 70, 95-110.
14. Gao, F.; Yang, Y.; (2001) Shao, C. Robust iterative learning control with applications to injection molding process. Chem. Eng. Sci., 56, 7025-7034.
15. Gorinevsky, D. (2002) Loop shaping for iterative control of batch processes. IEEE Control Syst. Mag., 22 (6), 55-65.
16. Xiong, Z.; Zhang, J. (2003) Product quality trajectory tracking in batch processes using iterative learning control based time-varying perturbation models. Ind. Eng. Chem. Res., 42 (26), 6802-6814.
17. Zhuchenko L.K Fault-tolerant control system of the formation of carbon products. K.: NTUU «KPI», - 22 – 29p.
18. Yeong Koo Yeo. Chemical Engineering Computation with MATLAB 2nd Edition RC Press; 2nd edition (December 16, 2020). 847 p.