

Р. П. МИГУЩЕНКО, О. Ю. КРОПАЧЕК, І. М. КОРЖОВ, Т. О. БАРАНЮК

ОТРИМАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ БАГАТОЗОННИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ ШЛЯХОМ ПРАКТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

Сучасне промислове обладнання являє собою обширну кон'юктуру об'єктів промислового та сільськогосподарського призначення. Такі об'єкти потребують контролю технічних і технологічних процесів під час їх функціонування та можливості управління названими процесами в режимі реального часу. Побудова систем контролю і управління промисловими об'єктами потребує вивчення таких об'єктів, а це неможливо без наявності відповідної математичної моделі процесів, що протікають в обладнанні. Відомо, що будь-які процеси можуть бути описані диференціальними рівняннями відповідного порядку. Проте, практична робота з такими рівняннями на виробничому рівні вкрай ускладнена. Перетворення диференціальних рівнянь в алгебраїчні за допомогою перетворення Лапласа дозволяє здійснювати теоретичне чи імітаційне моделювання у виробничих умовах. Найбільш поширеними процесами, які протікають в промислових об'єктах, є теплові і вібраційні процеси. Математичні моделі дозволяють оцінити відповідні процеси в технічних (технологічних) об'єктах, визначити статичні та динамічні характеристики процесів, виявити рівень взаємного впливу блоків об'єктів, провести імітаційне моделювання процесів тощо. Традиційно існує два можливих способи отримання математичних моделей процесів в промислових об'єктах – теоретичний, оснований на побудові рівнянь за апріорними відомостями з наступною верифікацією результату, та методи практичної ідентифікації, оснований на знятті вихідних характеристик об'єкту на практиці. Зважаючи на доступність об'єкту дослідження авторами був обраний другий шлях. В якості промислового об'єкту був прийнятий двошнековий екструдер виробництва ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ПАКС», м. Харків, який може застосовуватися у складі обладнання для гранулювання зі стренговою порізкою. Авторами виконані роботи з практичної ідентифікації промислового об'єкту, отримані та проаналізовані математичні моделі процесів в об'єкті, надані рекомендації по створенню інформаційно-вимірювальної системи обраного обладнання.

Ключові слова: математична модель, практична ідентифікація, багатозонний технологічний агрегат, температура, вібрація, передавальна функція, динамічний компенсатор.

R. MYGUSHCHENKO, O. KROPACHEK, I. KORZHOV, T. BARANIUK

OBTAINING MATHEMATICAL MODELS OF MULTI-ZONE TECHNOLOGICAL UNITS THROUGH PRACTICAL IDENTIFICATION

Modern industrial equipment represents an extensive conjuncture of industrial and agricultural objects. Such objects require control of technical and technological processes during their operation and the ability to manage said processes in real time. The construction of control and management systems of industrial objects requires the study of such objects, and this is impossible without the presence of an appropriate mathematical model of the processes occurring in the equipment. It is known that any processes can be described by differential equations of the appropriate order. However, practical work with such equations at the production level is extremely complicated. The transformation of differential equations into algebraic ones using the Laplace transformation allows for theoretical or simulated modeling in production conditions. The most common processes occurring in industrial facilities are thermal and vibration processes. Mathematical models, in the form of transfer functions, represent aperiodic links with a delay and oscillating links. Mathematical models make it possible to evaluate relevant processes in technical (technological) objects, to determine the static and dynamic characteristics of processes, to identify the level of mutual influence of blocks of objects, to conduct simulation modeling of processes, etc. Traditionally, there are two possible methods of obtaining mathematical models of processes in industrial facilities - the theoretical one, based on the construction of equations based on a priori information with the subsequent verification of the result, and the methods of practical identification, based on the removal of the initial characteristics of the object in practice. Taking into account the availability of the research object, the authors chose the second way. As an industrial facility, a two-screw extruder manufactured by Scientific and Production Enterprise "PAKS" LLC, Kharkiv, was adopted, which can be used as part of granulation equipment with a string cut. The authors performed work on the practical identification of an industrial object, obtained and analyzed mathematical models of processes in the object, provided recommendations for creating an information and measurement system of the selected equipment.

Keywords: mathematical model, practical identification, multi-zone technological unit, temperature, vibration, transfer function, dynamic compensator.

Постановка проблеми. Визначення математичної моделі об'єкту або процесів, які у ньому протікають, є надзвичайно важливою задачею при дослідженнях обладнання промислового та сільськогосподарського призначення [1–3]. Наявність математичних моделей об'єктів та процесів дозволяє отримати характеристики обладнання, визначити його основні параметри, провести теоретичне і імітаційне моделювання тощо. Без наявних математичних моделей об'єктів та процесів неможливо грамотно синтезувати системи контролю чи управління досліджуваного обладнання [4, 5].

Побудова математичних моделей об'єктів та процесів принципово можлива двома шляхами:

- теоретичний синтез [6];
- отримання моделей експериментальним шляхом [7].

Експериментальний і теоретичний шляхи мають свої переваги і недоліки. Тому в більшості досліджень стараються поєднувати, в розумній степені, переваги цих підходів. В даній статті прийнято рішення зосередитись на отриманні моделей об'єктів та процесів промислового та сільськогосподарського обладнання експериментальним шляхом. Вибір експериментального методу при розробці математичних моделей, обраного для дослідження агрегату, зумовлений наявністю датчиків ідентифікованих параметрів, наявністю стандартних регістраторів, наявністю перевірених і добре зарекомендованих методик обробки інформації, апріорними відомостями про структуру об'єкта дослідження.

В якості базового методу отримання моделей об'єктів та процесів обрано метод практичної

ідентифікації. Це дозволяє одержати динамічні моделі з виявленням транспортного запізнення, інерційностей, переколивань та перейти від моделей з розподіленими параметрами до моделей із зосередженими параметрами [8].

Вибір об'єкта дослідження. В якості об'єкта дослідження, в даній статті, обрано двохшнековий екструдер, який здійснює переробку та виготовлення матеріалів з термопластів (поліолефінів, ПВХ, тощо) [9]. Обраний агрегат здійснює технологічний процес гранулювання зі стренговою порізкою. Типова схема гранулятора на базі екструдера наведена на рис. 1 [10].

Зазначений на рис. 1 гранулятор складається з наступних складових: 1 – екструдер, 2 – ванна охолодження стренг, 3 – механізм стренгової порізки, 4 – пульт керування.

Вхідна сировина надходить до екструдера 1 (див. рис. 1), в якому під дією фізико-механічних перетворень, а саме, багатоступеневим механічним подрібненням та термічною обробкою, перетворюється на стренги, які з виходу екструдера потрапляють у ванну охолодження стренг 2. У ванні стренги охолоджуються під дією проточної води, що призводить до їх затвердівання. Далі стренги подрібнюються за допомогою механізму стренгової порізки 3, на виході якого, виходить кінцевий продукт – гранули. Керування та індикація параметрів обладнання для гранулювання зі стренговою порізкою, здійснюється за допомогою пульта керування 4.

Найбільший інтерес у зазначеному обладнанні для гранулювання зі стренговою порізкою, з точки зору контролю та діагностування, представляє екструдер (рис. 2), так як [10]:

- більша частина фізико-механічного перетворення вхідної сировини відбувається у екструдері;

- екструдер найбільш вартісна частина зазначеного обладнання для гранулювання зі стренговою порізкою;

- екструдер найбільш складний технологічний об'єкт та найменш надійний у порівнянні з іншими частинами обладнання для гранулювання зі стренговою порізкою;

- вихід зі строю екструдера призводить до тривалого простою технологічної лінії і вартісного ремонту.

Екструдер працює наступним чином. Електродвигун (рис. 3) через редуктор та редуктор-розгалужувач призводить до обертального руху шнеків (рис. 4). Шнеки проштовхують вхідну сировину, яка поступає через приймальний бункер, крізь зони нагрівання. В зонах нагрівання, завдяки нагрівальним елементам, підтримуються задані температури згідно зі встановленим технологічним процесом. Під дією температури та механічного подрібнення вхідна сировина розплавляється у однорідну рідку масу, яка виходить через матрицю формування стренгів (рис. 4) – кінцевий продукт екструдера. Керування екструдером, а саме, встановлення частоти обертання шнеків та температур для кожної із зон нагрівання, здійснюється за допомогою пульта керування та індикації (рис. 5), на якому також відображаються реальні значення параметрів під час ведення технологічного процесу. Всі зазначені вузли екструдера змонтовані на жорсткій станині за допомогою елементів кріплення.

Найбільш вразливими вузлами екструдера є зони нагрівання (нагрівальні елементи) та підшипники кочення у редукторі-розгалужувачі. Вихід зі строю нагрівального елемента впливає на весь технологічний процес, включаючи якість вихідної продукції та технічний стан екструдера в цілому. Зменшення нормованої температури в одній із зон нагрівання призводить до підвищення навантаження на підшипники редукторів, і в першу чергу, редуктора-розгалужувача. Підвищення температури, відносно нормованої, призводить до пригорання вхідної сировини до стінок зони і шнеків, що також негативно впливає на технічний стан рухомих вузлів екструдера.

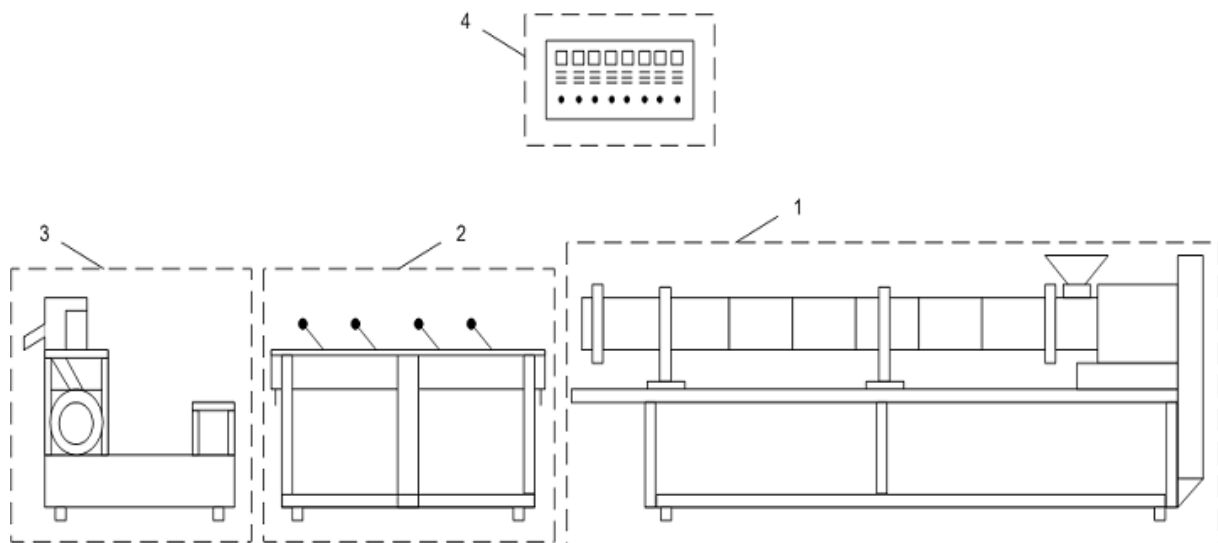


Рис. 1. Типова схема гранулятора на базі екструдера



Рис. 2. Екструдер



Рис. 3. Двигун з подвоювачем



Рис. 4. Шнеки



Рис. 5. Вихідна матриця

Не менші проблеми відбуваються при виході зі строю підшипників редуктора-розгалужувача. А саме довготривала зупинка технологічного процесу, складний та вартісний ремонт, підгоряння та застигання вхідної сировини у зонах нагрівання, що досить сильно ускладнює повторний запуск технологічного процесу. Також вихід зі строю зазначених підшипників може спричинити негативні наслідки для редуктора і електродвигуна, що ще більше ускладнює та здорожчує ремонтні роботи. Стан підшипників кочення, традиційно, контролюють оцінкою механічної вібрації у процесі функціонування відповідного вузла [10].

Таким чином, для контролю та діагностування стану робочих зон нагрівання екструдера і стану підшипників кочення редуктора-розгалужувача необхідний моніторинг температури (діапазон 0–300 °С) та механічної вібрації (діапазон від 100 кГц) відповідно [11].

Отримання математичної моделі процесу вібрації. Виходячи з прийнятого класу моделей, а також із аналізу фізичної природи об'єкту було прийнято рішення про використання методу практичної ідентифікації по перехідним характеристикам $h(t)$ [12]. Обраний метод передбачає подачу на об'єкт одиничних функцій типу «прямокутна хвиля» або близьких до неї і вимірювання вихідної координати вимірювальним каналом. На практиці алгоритм ідентифікації реалізований на основі експериментальної установки. Установка абстрагована від впливу дестабілізуючих факторів і здійснена можливість вимірювання перехідної характеристики об'єкту дослідження шляхом багатократних спостережень.

З метою зниження залежності результатів ідентифікації від перешкод для кожного з j -зразків передбачена процедура попередньої фільтрації даних (згладжування). При цьому автори використовували алгоритм згладжування функцій параболічним фільтром другого порядку, який є придатним для коливальних перехідних процесів, якими і є попередньо вивчені на якісному рівні процеси в досліджуваному об'єкті. Значення оцінки перехідної функції \hat{h}_i обчислюються за формулою [12]:

$$\hat{h}_i \approx z_i - \frac{1}{12} \delta^4 z_i, \quad (1)$$

де $\delta^4 z_i$ – центральна четверта різниця функції z_i .

Після проведення серії експериментів з динамічної ідентифікації об'єкта досліджень були отримані дані ряду V_i , виходячи із показань регістратора, які осереднені по L -секціям. У відповідності з прийнятим алгоритмом ряд показань регістратора був згладжений методом четвертих різниць на основі формули (1) і денормований в ряд K_i :

$$\hat{h}_0 = z_0 - \frac{1}{5} \delta^3 z_{1/2} + \frac{1}{12} \delta^4 z_2;$$

$$\hat{h}_1 = z_1 + \frac{2}{5}\delta^3 z_{1/3} - \frac{1}{7}\delta^4 z_2; \quad W(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}. \quad (2)$$

$$\hat{h}_n = z_n + \frac{1}{5}\delta^3 z_{(n-2)/(n-1)} + \frac{1}{12}\delta^4 z_{n-2};$$

$$\hat{h}_{n-1} = z_{n-1} - \frac{2}{5}\delta^3 z_{(n-2)/(n-1)} - \frac{1}{7}\delta^4 z_{n-2},$$

де $\delta^3 z_{\mu/(\mu+1)}$ – центральна третя різниця:

$$\delta^3 z_{\mu/(\mu+1)} = z_{\mu-1} - 3z_{\mu} + 3z_{\mu+1} - z_{\mu+2},$$

де $\mu = 1, 2, \dots, n-2$.

Наступним етапом динамічної ідентифікації є знаходження структури і кількісних значень параметрів основних передавальних функцій [12, 13].

Апріорні відомості про об'єкт та натурні спостереження показали, що вимірний процес є коливальним і може бути описаним наступним чином [14]:

- у вигляді диференційного рівняння:

$$(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)y = kx,$$

де k – коефіцієнт передачі ланки;

T_i – сталі часу,

причому T_1 і T_2 пов'язані умовою:

$$\zeta = \frac{T_2}{2T_1} < 1,$$

- у вигляді передавальної функції:

$$W(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1},$$

- у вигляді перехідної характеристики:

$$h(t) = k \left[1 - \frac{\sqrt{\alpha^2 + b^2}}{\beta} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \arctg \frac{\beta}{\alpha}) \right],$$

$$\text{де } \alpha = -\frac{T_2}{2T_1^2}, \quad \beta = \frac{\sqrt{4T_1^2 - T_2^2}}{2T_1^2}.$$

- у вигляді амплітудно-фазової функції:

$$W(j\omega) = \frac{k(1 - T_1^2 \omega^2) - jkT_2 \omega}{(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + T_2^2 \omega^2},$$

- у вигляді амплітудно- і фазочастотної функцій:

$$\begin{cases} A(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - T_1^2 \omega^2)^2 + T_2^2 \omega^2}}, \\ \varphi(\omega) = -\arctg \frac{T_2 \omega}{1 - T_1^2 \omega^2}. \end{cases}$$

Всі способи представлення коливальної ланки є ідентичними. В даній статті прийнятий метод представлення на основі передавальної функції:

$$W(p) = \frac{k}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}. \quad (2)$$

Визначення чисельних значень параметрів у (2), а саме k , T_1 , T_2 , може бути виконано декількома методами, які описані в [13]. В даній статті для визначення вказаних параметрів були застосовані наступні співвідношення [12]:

$$\left. \begin{aligned} k &= y_{уст} \quad \text{при } x_{уст} = 1, \\ T_1^2 &= \frac{1}{\lambda^2 + \theta^2}, \\ T_2 &= -\frac{2\lambda}{\lambda^2 + \theta^2}, \end{aligned} \right\}$$

де $y_{уст}$ – усталене значення вихідної координати вимірювального каналу;

$x_{уст}$ – одиничне вхідне збурення;

λ і θ обчислюються безпосередньо по перехідній характеристиці наступним чином:

$$\theta = \frac{2\pi}{\rho},$$

$$\lambda = \frac{1}{\rho} 2,31 \lg \frac{\Delta y_{макс2}}{\Delta y_{макс1}},$$

де ρ – період власних автоколиваний, що визначається з перехідної характеристики $h(t)$ при усталеному значенні;

$\Delta y_{макс1}$ і $\Delta y_{макс2}$ – амплітуди автоколиваний.

Результатом проведеної практичної ідентифікації отримані кількісні значення (2), а сама динамічна модель має вигляд:

$$W(p) = \frac{0,13}{2,17 \cdot 10^{-5} p^2 + 2,01 \cdot 10^{-3} p + 1} e^{-3 \cdot 10^{-3} p} \quad (3).$$

Отримання математичних моделей теплових процесів в екструдері. Розрахунок динамічних моделей теплових об'єктів є складною задачею, де стан об'єкту описується рівняннями в частинних похідних, інтегральними рівняннями, а часом більш складними функціональними рівняннями. Тому об'єкти з розподіленими параметрами, як правило, стараються замінити відповідною системою із зосередженими. Перехід до моделей із зосередженими параметрами обумовлений локальним розміщенням датчиків (в певних точках) і нагрівачів (в певних областях) реальних технологічних об'єктів.

В даному випадку розподілену теплову систему екструдера змінимо на зосереджену з відображенням функцій взаємного впливу. Така модель має вигляд [14]:

$$W(p) = \begin{bmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) & W_{13}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) & W_{23}(p) \\ W_{31}(p) & W_{32}(p) & W_{33}(p) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де $W_{11}(p)$, $W_{22}(p)$, $W_{33}(p)$ – функції, що визначають передачу збурення з боку локальних регуляторів температури на екструдер з фіксацією температур T_1 , T_2 , T_3 ;

$W_{12}(p)$, $W_{13}(p)$, $W_{21}(p)$, $W_{23}(p)$, $W_{31}(p)$, $W_{32}(p)$ – функції, які відображають перехресні впливи.

Структура моделі (4) дозволяє визначати клас моделей при ідентифікації – лінійні, неперервні, з зосередженими параметрами, одномірні, стаціонарні, детерміновані.

В ході вирішення задачі ідентифікації необхідно:

- визначити структуру і параметри передавальних функцій $W_{11}(p)$, $W_{22}(p)$, $W_{33}(p)$;

- визначити функції взаємного впливу $W_{21}(p)$, $W_{31}(p)$, $W_{32}(p)$ (прямі (напрямок передачі тепла відповідає напрямку руху сировини)), $W_{12}(p)$, $W_{13}(p)$, $W_{23}(p)$ (обернені (напрямок передачі тепла протилежний напрямку руху сировини)).

Як відомо з теорії автоматичного управління тепловий об'єкт являє собою інерційну ланку із запізненням, передавальна функція якої має вигляд:

$$W(p) = \frac{k}{\prod_{i=1}^n (T_i p + 1)} e^{-\tau p}, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт передачі ланки;

T_i – сталі часу,

τ – транспортне запізнення.

В даній статті для визначення параметрів (5) був прийнятий метод послідовного логарифмування, який відрізняється своєю простотою і надійністю отриманих результатів. Єдиним недоліком цього методу є поява суб'єктивних помилок під час проведення графічних операцій.

Ідея методу полягає у послідовному наближенні аналітичної залежності:

$$h(t) \approx h(t_y) - \sum_{i=1}^n C_i e^{-\Psi_i t}, \quad (6)$$

де $h(t)$ – перехідна функція, яка відповідає усталеному значенню;

Ψ_i – корені характеристичного рівняння;

C_i – постійні коефіцієнти;

n – порядок рівняння,

до шуканої перехідної функції $h(t)$ спочатку розв'язком рівняння першого порядку, і якщо ця апроксимація виявиться незадовільною, то розв'язком рівняння другого порядку і т. д. Порядок аналітичної перехідної функції збільшується до тих пір, поки $h(t)$ не буде апроксимована з необхідною точністю.

Із залежності (6) визначаються параметри k , T_i , n ланки (5). Величина транспортного запізнення τ визначається як відрізок часу, всередині якого виконується нерівність [15]:

$$0 \leq h(t) < \Delta,$$

де Δ – похибка вимірювальної апаратури.

В ході досліджень теплових процесів у

двохшнековому екструдері була визначена модель (4), яка прийняла вигляд:

$$W_o = \begin{bmatrix} \frac{44,6 \exp(-24p)}{(1+354p)(1+174p)} & \frac{6,9 \exp(-390p)}{(1+570p)(1+120p)} & 0 \\ \frac{6,3 \exp(-318p)}{(1+756p)(1+240p)} & \frac{64,2 \exp(-12p)}{(1+192p)(1+102p)} & \frac{\exp(-1260p)}{(1+846p)(1+264p)} \\ \frac{5 \exp(-726p)}{(1+690p)(1+216p)} & \frac{6,1 \exp(-486p)}{(1+582p)(1+408p)} & \frac{45,2 \exp(-6p)}{(1+156p)(1+204p)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Математична модель (7) вказує на високий рівень перехресних впливів в робочій тепловій зоні екструдера за винятком параметру $W_{13}(p)$.

Синтез моделі компенсатора. Наявність багатозв'язності в досліджуваному агрегаті, в робочій тепловій зоні екструдера, показала, що управління тепловими процесами ускладнене через наявність перехресних зв'язків – додаткових дестабілізуючих факторів. Це, в першу чергу, впливає на постійні часу агрегату, знижує його мобільність, призводить до додаткових втрат сировини і фінансів. Для усунення названих недоліків необхідно привести модель (7) до вигляду [16]:

$$W(p) = \begin{bmatrix} W_{11}(p) & 0 & 0 \\ 0 & W_{22}(p) & 0 \\ 0 & 0 & W_{33}(p) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Для отримання моделі об'єкту у вигляді (8) із моделі (6) необхідно синтезувати компенсатор.

Суть побудови динамічного компенсатора полягає в одержанні результуючої математичної моделі робочої теплової зони екструдера діагонального виду (8) шляхом введення компенсатора $W_K(p)$ у вимірювальний канал. При цьому, принципово, компенсатор може бути введеним двома шляхами.

Перший шлях введення компенсатора направлений на розв'язування каналів багатозв'язної системи застосуванням локального регулятора перехресних зв'язків і, як правило, використовується в замкнених системах. Другий підхід направлений на компенсацію впливу перехресних зв'язків автоматичним введенням відповідних поправок і використовується в розімкнених системах.

Вибір структури компенсації визначається специфікою досліджуваного промислового агрегату і економічною ефективністю. В нашому випадку специфіка робочої теплової зони екструдера дозволяє розглядати лише другий варіант.

Відповідно до [16] модель динамічного компенсатора визначається з рівняння для розімкнених систем:

$$W_K(p)W_o(p) = \text{diag}W_o(p) = W_\Sigma(p)$$

і має наступний вигляд:

$$W_K(p) = \text{diag}W_o(p) \cdot W_o^{-1}(p), \quad (9)$$

де $W_K(p)$, $W_O(p)$, $diag W_O(p)$ – динамічні моделі компенсатора, об'єкта без компенсації, об'єкта з компенсацією перехресних зв'язків відповідно.

Для розгляданого об'єкта, передавальні функції якого $W_{ii}(p)$, $W_{ij}(p)$, відповідно до (5), є інерційні ланки другого порядку із запізненням, динамічна модель $W_O^{-1}(p)$ приймає вигляд:

$$W_O^{-1}(p) = \begin{bmatrix} \frac{b_{11}}{\Delta} & \frac{b_{12}}{\Delta} & \frac{b_{13}}{\Delta} \\ \frac{b_{21}}{\Delta} & \frac{b_{22}}{\Delta} & \frac{b_{23}}{\Delta} \\ \frac{b_{31}}{\Delta} & \frac{b_{32}}{\Delta} & \frac{b_{33}}{\Delta} \end{bmatrix},$$

де b_{ij} – алгебраїчні доповнення елементів $W_{Oij}(p)$ моделі (9);

Δ – визначник моделі (7).

Сама модель компенсатора, відповідно до (9) знаходиться наступним чином:

$$W_K(p) = \begin{bmatrix} W_{11}(p) & 0 & 0 \\ 0 & W_{22}(p) & 0 \\ 0 & 0 & W_{33}(p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{b_{11}}{\Delta} & \frac{b_{12}}{\Delta} & \frac{b_{13}}{\Delta} \\ \frac{b_{21}}{\Delta} & \frac{b_{22}}{\Delta} & \frac{b_{23}}{\Delta} \\ \frac{b_{31}}{\Delta} & \frac{b_{32}}{\Delta} & \frac{b_{33}}{\Delta} \end{bmatrix}$$

ї має вигляд:

$$W_K(p) = \begin{bmatrix} \frac{W_{11}(p)}{\Delta} & \frac{W_{12}(p)}{\Delta} & \frac{W_{13}(p)}{\Delta} \\ \frac{W_{21}(p)}{\Delta} & \frac{W_{22}(p)}{\Delta} & \frac{W_{23}(p)}{\Delta} \\ \frac{W_{31}(p)}{\Delta} & \frac{W_{32}(p)}{\Delta} & \frac{W_{33}(p)}{\Delta} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Висновок. В статті проаналізоване обладнання, яке виконує процес гранулювання зі стренговою порізкою, основним елементом якого є двошнєковий екструдер. Виявлені найбільш вразливі місця екструдера і отримані математичні моделі вібраційних процесів (3) і теплових процесів (7). Розроблена модель компенсатора перехресних зв'язків (10).

Список літератури

1. Старжинский В. Е., Фарберов А. М., Песецкий С. С., Осипенко С. А. *Точные пластмассовые детали и технология их получения*. Минск: Наука і тэхніка, 1992. 309 с.
2. Мигущенко Р. П., Коржов І. М. Аналіз типового промислового обладнання виготовлення та переробки термопластів та інших пластмас з точки зору контролю та діагностики. *Актуальні проблеми автоматики і приладобудування. Матеріали 2-ї міжнародної науково-технічної конференції (6–7 грудня 2018 р., Харків)*. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. С. 198–199.
3. Мигущенко Р. П., Кропачек О. Ю., Семенченко А. С., Матяш К. В. Дослідження системи управління вібраційним об'єктом. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Сер.: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. № 5. С. 177–183.
4. Мигущенко Р. П. *Елементи контролю та діагностики стану*

5. *вібраційних об'єктів: монографія*. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. 224 с.
5. Овчаренко А. И., Сухер А. Н., Мигущенко Р. П. Постановка задачі оптимального управління многозонными проходными технологическими агрегатами. *Сб. науч. тр. ХГПУ «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье»*. Вып. 7. Харьков, 1999. С. 299–302.
6. Мигущенко Р. П., Кропачек О. Ю. Разработка и исследование математических моделей многозонных проходных агрегатов. *Автоматизированные системы управления и автоматики*. Вып. 131. С. 73–82.
7. Новоселов О. Н. Идентификация состояния динамических объектов по измеряемым параметрам: от теории к практике. *Измерительная техника*. 2010. № 2. С. 20–24.
8. Петрухин В. В., Петрухин С. В. *Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации*. Инфра-Инженерия, 2010. 168 с.
9. *Екструдер двошнєковий. Технічний паспорт. ПАКС01.00.000 ПС*. Харків: ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ПАКС», 2015. 53 с.
10. Коржов І. М. *Пристрій контролю та діагностування стану промислових динамічних об'єктів: дис. ... д-ра філософії: 152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка*. Харків, 2019. 304 с.
11. Мигущенко Р. П. *Методи і пристрої систем багатопараметрової функціональної діагностики вібраційних об'єктів (теоретичні основи та впровадження): дис. ... д-ра техн. наук: 05.11.13*. Харків, 2014. 475 с.
12. Кропачек О. Ю. *Методы и устройство контроля виброускорений стенок топливопровода высокого давления дизельных агрегатов: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13*. Харьков, 2004. 186 с.
13. Мигущенко Р. П. *Адаптивная система управления многозонными проходными технологическими агрегатами: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07*. Харьков, 2001. 178 с.
14. Щапов П. Ф., Мигущенко Р. П., Кропачек О. Ю. *Теоретичні та практичні засади систем контролю та діагностування складних промислових об'єктів: монографія*. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. 260 с.
15. Бастль В., Бендит Г., Бервегер П. *Измерения в промышленности: справочник*. Металлургия, 1980. 648 с.
16. Рей У. *Методы управления технологическими процессами*. Мир, 1983. 368 с.

References (transliterated)

1. Starzhinskiy V. E., Farberov A. M., Pesetskiy S. S., Osipenko S. A. *Tochnye plastmassovye detali i tekhnologiya ikh polucheniya* [Precise plastic parts and technology for their production]. Minsk, Navuka i tekhnika Publ., 1992. 309 p.
2. Myhushchenko R. P., Korzhov I. M. Analiz tipovogo promyslovoho obladdannya vyhotovlennya ta pererobky termoplastiv ta inshykh plastmas z tochyky zoru kontrolyu ta diahnostryky [Analysis of typical industrial equipment for manufacturing and processing thermoplastics and other plastics in terms of control and diagnostics]. *Aktual'ni problemy avtomatyky i prykladobuduvannya. Materialy 2-yi mizhnarodnoyi naukovy-tekhnichnoyi konferentsiyi (6–7 hrudnya 2018 r., Kharkiv)* [Actual problems of automation and instrument engineering. Materials of the 2nd Int. Sci.-Techn. Conf. (6–7 December 2018, Kharkiv)]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, pp. 198–199.
3. Myhushchenko R. P., Kropachek O. Yu., Semenchenko A. S., Matyash K. V. Doslidzhennya systemy upravlinnya vibratsiynym ob'yektom [Study of the control system of a vibrating object]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI". Seriya: Matematychni modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mathematical Modeling in Engineering and Technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2013, no. 5, pp. 177–183.
4. Myhushchenko R. P. *Elementy kontrolyu ta diahnostryky stanu vibratsiynykh ob'yektiv* [Elements of control and diagnostics of the state of vibrating objects]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2014. 224 p.
5. Ovcharenko A. I., Sukher A. N., Migushchenko R. P. *Postanovka zadachi optimal'nogo upravleniya mnogozonnyimi prokhodnyimi tekhnologicheskimi agregatami* [Formulation of the optimal control problem for multi-zone pass-through process units]. *Sb. науч. тр. ХГПУ «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье»*. Вып. 7 [Collection of

- scientific papers KHPU "Information technology: science, technology, technology, education, health". Issue 7]. Kharkov, 1999, pp. 299–302.
6. Migushchenko R. P., Kropachek O. Yu. Razrabotka i issledovanie matematicheskikh modeley mnogozonnykh prokhodnykh agregatov [Development and research of mathematical models of multizoned through passage units]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya i avtomatiki*. 2005, issue 131, pp. 73–82.
 7. Novoselov O. N. Identifikatsiya sostoyaniya dinamicheskikh ob"ektov po izmeryaemym parametram: ot teorii k praktike [Identification of the state of dynamic objects by measured parameters: from theory to practice]. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2010, no. 2, pp. 20–24.
 8. Petrukhin V. V., Petrukhin C. V. *Osnovy vibrodiagnostiki i sredstva izmereniya vibratsii* [Fundamentals of vibrodiagnostics and vibration measuring instruments]. *Infra-Inzheneriya Publ.*, 2010. 168 p.
 9. *Ekstruder dvoshnekovyy. Tekhnichnyy pasport. PAKS01.00.000 PS* [Extruder twin-screw. Technical data sheet. PAKS01.00.000 PS]. Kharkiv, TOV "Naukovo-vyrobnyche pidpryemstvo "PAKS" Publ., 2015. 53 p.
 10. Korzhov I. M. *Prystryi kontrolyu ta diahnostuvannya stanu promyslovykh dynamichnykh ob"yektiv: dys. ... d-ra filozofiyi: 152 – Metrolohiya ta informatsiyno-vymiryval'na tekhnika* [Device for control and diagnostics of the state industrial dynamic objects. Dr. of Philosophy]. Kharkiv, 2019. 304 p.
 11. Myhushchenko R. P. *Metody i prystroyi system bahatoparametrovoyi funktsional'noyi diahnostyky vibratsiynykh ob"yektiv (teoretychni osnovy ta vprovadzhennya): dys. ... d-ra tekhn. nauk 05.11.13* [Methods and apparatus of systems for multiparameter functional diagnostics of vibrating objects (theoretical foundations and implementation). Dr. eng. sci. diss.]. Kharkiv, 2014. 475 p.
 12. Kropachek O. Yu. *Metody i ustroystvo kontrolya vibroukorennykh stenok toplivoprovoda vysokogo davleniya dizel'nykh agregatov: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.11.13* [Methods and devices for controlling the vibration acceleration of the walls of the high-pressure fuel line of diesel units. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kharkov, 2004. 186 p.
 13. Migushchenko R. P. *Adaptivnaya sistema upravleniya mnogozonnyimi prokhodnyimi tekhnologicheskimi agregatami: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.07* [Adaptive control system of multizone passing technological units. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kharkov, 2001. 178 p.
 14. Shchapov P. F., Myhushchenko R. P., Kropachek O. Yu. *Teoretychni ta praktichni zasady system kontrolyu ta diahnostuvannya skladnykh promyslovykh ob"yektiv* [Theoretical and practical principles of control systems and diagnostics of complex industrial objects]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015. 260 p.
 15. Bastl' V., Bendit G., Berveger P. *Izmereniya v promyshlennosti* [Measurements in industry]. *Metallurgiya Publ.*, 1980. 648 p.
 16. Rey U. *Metody upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* [Technological process control methods]. *Mir Publ.*, 1983. 368 p.

Надійшло (received) 10.09.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Мигущенко Руслан Павлович (Mygushchenko Ruslan) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», проректор з науково-педагогічної роботи; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2523-595X>; e-mail: mrp1@ukr.net

Кропачек Ольга Юрїївна (Kropachek Olga) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Теоретичні основи електротехніки»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5899-0252>; e-mail: kropachek@ukr.net

Коржов Ігор Михайлович (Korzhov Igor) – доктор філософії, Державне підприємство «Харківський регіональний науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації», інженер з метрології; м. Харків, Україна; e-mail: troublerbv@gmail.com

Баранюк Тарас Олександрович (Baraniuk Taras) – Нововолинський науковий ліцей Волинської обласної ради; м. Нововолинськ, Україна; e-mail: baraniuktaras098@gmail.com