[10] ГОСТ 28269-89 Котлы паровые стационарные большой мощности. Общие технические требования. [Действующий с 1991-01-01]. Изд. офиц. Москва : Стандартинформ, 2006. 21 с.

References

[1] O'Dwyer, A. *Handbook of PI and PID controller tuning rules*. 3rd ed. Dublin Institute of Technology, p. 624, 2009.
[2] Denisenko, V.V. *PID-regulators: principles of construction and modification.* Modern automation technologies, №1, 68-88, 2007.
[3] Kovrigo, Y.M., Bunke, A.S., Novikov, P.V. *Application of the method of dynamic correction in control systems of inertial technological objects*. Scientific Science Rise, №1/2(18), 21-27, 2006.
[4] Kovrigo, Yu.M. , Konovalov, M.A., Bunke, A.S. *Modernizing the heat load control system of a oncethrough boiler unit at a thermal power station using a dynamic corrector*. Thermal Engineering, 59(10, p.772-778, 2012.
[5] Kovrigo, Yu. M., Bagan, T.G., Bunke, A.S. *Securing Robust Control in Systems for Closed Loop Control of Inertial Thermal Power Facilities*. Thermal Engineering, 61(3), p.183-188, 2014.
[6] Shtifzon, O., Novikov, P., Bahan T. *Development of the adaptive fuzzy-logic device for control system in conditions of parametric non-stationary plant*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies - 1/2 (91), p. 30-37, 2018.
[7] Kobersi, I.S., Finaev, V., Almasani, S.A., Wadii, K., Abdo A. *Control of the Heating System with Fuzzy Logic*. World Applied Sciences Journal,. 23 (11), p.1441-1447, 2013.
[8] Kovrigo, Yu.M., Bunke, A.S., Novikov, P.V. *Fuzzy-controller for control inertical technological parameters of TPP*. Nauka i Studia NR 8 (169), p. 76-84, 2017.
[9] Shtifzon, O.I., Babych, A.S. *Using fuzzy logic algorithms to control an object with parametric variability*. Material for the 10-th international scientific practical conference, "Nainovitne nauchni comprehension", P. 34. Technologue, Sophie, 46-52, 2014.
[10] GOST 28269-89 Stationary steam boilers of great capacity. General technical requirements. [Operating since 1991-01-01]. Moskov : Standartinform, 21 p., 2006.

УДК 681.5.015

ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПРОГНОЗУВАЛЬНОЇ МОДЕЛІ У СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Жученко О.А.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна.
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5611-6529
E-mail: azhuch@ukr.net

DOI:

Анотація: *Використання сучасних технічних засобів не вирішують проблему складності розв'язання систем нелінійних, а іноді і нестаціонарних диференціальних рівнянь у частинних похідних, які описують технологічні об'єкти з розподіленими параметрами. Один з варіантів вирішення цієї проблеми є побудова на основі початкових* *моделей більш простих моделей із значно меншим часом розрахунку при забезпеченні ефективного відтворення тих властивостей початкових моделей, які дослідник вважає головними для синтезу ефективної системи керування.*

Для підвищення ефективності технологічних процесів промислових виробництв доцільно впроваджувати системи керування з прогнозувальною моделлю.

Метою даної роботи є розроблення методу параметричної ідентифікації спрощеної математичної моделі об'єктів з розподіленими параметрами в умовах її використання як прогнозувальної в системі керування технологічними процесами.

***Abstract:** The using of modern technical means does not solve the problem of the complexity of solving systems of nonlinear, and sometimes non-stationary differential equations in partial derivatives, which describe technological objects with distributed parameters. One of the solutions to this problem is the construction on the basis of initial models of simpler models with significantly less time to calculate when ensuring the effective reproduction of those properties of initial models, which the researcher considers the main to synthesize an effective control system.*

In order to increase the efficiency of industrial processes, it is expedient to introduce control systems with a predictive model.

The purpose of this work is to develop a method of parametric identification of a simplified mathematical model of objects with distributed parameters in conditions of its use as a predictive in the control system of technological processes.

Ключові слова: математична модель, розподілені параметри, ідентифікація, технологічний процес, прогнозувальна модель.

Keywords: mathematical model, distributed parameters, identification, technological processes, predictive model.

Вступ

Одним з ефективних джерел підвищення ефективності технологічних процесів промислового виробництва є впровадження сучасних комп'ютерних систем керування, в основі роботи яких лежать математичні моделі даних процесів.

З точки зору задач автоматичного керування технологічні процеси у будь-якому промисловому виробництві, як правило, є об'єктами з розподіленими параметрами, математичний опис яких являє собою систему нелінійних, у деяких випадках нестаціонарних диференціальних рівнянь у частинних похідних [1-4]. Розрахунок таких математичних моделей навіть сучасними засобами обчислювальної техніки вимагає тривалого часу (іноді десятки годин), що суттєво обмежує їх застосування у системах керування реального часу. Вихід з такої ситуації – побудова на основі початкових моделей більш простих моделей із значно меншим часом розрахунку при забезпеченні ефективного відтворення тих властивостей початкових моделей, які дослідник вважає головними для синтезу ефективної системи керування.

Підвищення якості самої системи керування є окремою науково-технічною задачею. Для її розв'язання останні роки часто використовуються прогнозувальні математичні моделі [5-7].

Постановка задачі

Сучасні комп'ютерні системи керування, як правило, будуються на основі математичних моделей керованих процесів. Однак навіть для найбільш простих випадків об'єкти з розподіленими параметрами (ОРП) описуються точними математичними моделями достатньо складного виду. При цьому типовим наслідком моделювання поведінки ОРП диференціальними рівняннями у частинних похідних є трансцендентний характер залежності відповідних передатних функцій від комплексної змінної або опис цієї залежності у вигляді нескінченних рядів [1, 3, 8] навіть відносно зосереджених вхідних діянь, що суттєво ускладнює їх аналіз та використання при синтезі систем керування.

У більш складних випадках, наприклад, для просторово багатовимірних об'єктів зі складною формою границі області зміни просторових координат або при необхідності враховувати суттєві нелінійні ефекти, як правило, взагалі не вдається отримати аналітичний розв'язок рівнянь об'єкта [3].

Зазначені обставини привели до широкого поширення на практиці наближених моделей об'єктів з розподіленими параметрами спрощеного виду, що описують їх поведінку з потрібною точністю.

Одним із сучасних формалізованих підходів до синтезу систем управління, що базуються на математичних методах оптимізації, є теорія управління динамічними об'єктами з використанням прогнозувальних моделей - Model Predictive Control (MPC).

Цей підхід почав розвиватися на початку 60-х років XX століття для управління процесами і устаткуванням в нафтохімічному та енергетичному секторі, для яких застосування традиційних методів синтезу було вкрай неефективним у зв'язку з винятковою складністю їх математичних моделей. Останнім часом сфера застосування MPC значно розширилася, охоплюючи не тільки технологічні процеси різних галузей промисловості, а й економічні задачі при управлінні виробництвом [9] , для управління запасами і портфелем цінних паперів [10] та ін.

Основною перевагою MPC-підходу, що визначає його успішне використання у практиці побудови та експлуатації систем управління, є відносна простота базової схеми формування зворотного зв'язку, що поєднується з високими адаптивними властивостями. Остання обставина дозволяє керувати багатовимірними і багатозв'язними об'єктами зі складною структурою, оптимізувати процеси в режимі реального часу у рамках обмежень на керувальні і керовані змінні, враховувати невизначеності об'єктів керування.

Використання прогнозувальної моделі у системі керування передбачає її структурну та параметричну ідентифікацію. При побудові системи керування об’єктів з розподіленими параметрами структура прогнозувальної моделі фактично визначається на етапі спрощення початкової складної моделі.

Таким чином, метою даної статті є розроблення методу параметричної ідентифікації спрощеної математичної моделі об’єктів з розподіленими параметрами в умовах її використання як прогнозувальної в системі керування технологічними процесами.

Метод розділення змінних Фур’є

У даний час розроблено цілий ряд способів побудови наближених моделей об'єктів з розподіленими параметрами [11-18]. Всі вони можуть бути умовно поділені на дві основні групи по "предмету апроксимації".

Перша група характеризується різними способами спрощеного представлення самих вихідних диференціальних рівнянь об'єкта, подальше розв’язання яких відомими методами дозволяє отримати задовільні по точності в певних конкретних умовах опису властивостей ОРП у порівняно простому вигляді.

Методи другої групи базуються на наближеному поданні точних рішень рівнянь у частинних похідних, що моделюють поведінку ОРП. У деяких випадках методи обох груп призводять до абсолютно ідентичних результатів.

Звичайно, можливе "двоетапне" послідовне застосування до одного і того ж ОРП різних методів апроксимації, що дозволяють, наприклад, спочатку перейти до спрощеного, що допускає точне аналітичне рішення, рівняння об'єкта, для якого потім знайти дробово-раціональне наближення його передатної функції, що визначає підсумковий наближений опис вихідної моделі об'єкта.

Одним з найбільш ефективних методів побудови спрощеної математичної моделі ОРП є метод розділення змінних (метод Фур’є) [4, 19, 20], що передбачає представлення функції декількох змінних (часу і просторових координат) у формі нескінченного ряду, кожний член якого являє собою добуток двох функцій однієї змінної – часу та просторової координати

$$T(\xi,t)=\sum_{i=1}^{\infty}a_i(t)\varphi_i(\xi)\ , \tag{1}$$

де апріорі невідомі функції $a_i(t)$ та $\varphi_i(\xi)$ мають бути вибрані таким чином, щоб керована змінна $T(\xi,t)$ задовольняла граничним умовам задачі.

На практиці ряд (1) обмежують n членами

$$\hat{T}(\xi,t)=\sum_{i=1}^{n}a_i(t)\varphi_i(\xi) \tag{2}$$

і тоді задача апроксимації зводиться до визначення невідомих функцій $a_i\left(t\right)$ та $\varphi_i(\xi)$ із умови мінімізації певного функціонала похибки апроксимації та дослідженню збіжності $\hat{T}(\xi,t)$ до $T(\xi,t)$ при $n\to\infty$.

Дана задача розглядалася у працях багатьох авторів, зокрема [4, 13, 16, 21, 22]. Однак існуючі методи не повністю задовольняють дослідників з різних причин: у зв’язку з обчислювальними трудноще як такими, не завжди виконуються умови збіжності обчислювальних процедур, складно оцінити похибку апроксимації тощо.

У роботі [8] змінні $T(\xi,t)$ запропоновано виражати у вигляді ряду ортонормованих базисних векторів (БВ) φ_i (ξ) координати ξ, кожна з яких помножена на функцію часу $a_i(t)$ (коефіцієнти Фур’є):

$$a(k):=col\left\{a_i(t_k)\right\}_{i=1}^{N},$$

$$T(k):=col\left\{\breve{T}(\xi_l,t_k)\right\}_{l=1}^{N},$$

$$\varphi_i:=col\left\{\tilde{\varphi}_i(\xi_l)\right\}_{l=1}^{N} \quad \text{та} \quad \Phi:=(\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \dots \quad \varphi_N)\ .$$

Із урахуванням цього рівняння (2) можна записати так:

$$T(k)=\mathbf{\Phi}a(k)\,.$$

Алгоритми розрахунку φ_i (ξ) та $a_i(t)$ наведені у [8].

Метод системної ідентифікації

У системній ідентифікації, коли об’єкт дослідження представляється у вигляді «чорного ящика», існує багато методів знаходження їх динамічних моделей [23]. Згідно цих методів задається структура моделі, після чого проводиться оцінка параметрів моделі за рядом вхідних даних $\left\{\tilde{u}(k)\right\}_{k=0}^{K-1}$ та вихідних даних $\left\{\tilde{a}(k)\right\}_{k=0}^{K-1}$. Для об’єкта типу «чорний ящик» використовується модель у просторі станів

$$x(k+1) = Ax(k) + B_u u(k) \tag{3}$$
$$a(k) = C_a x(k)\,. \tag{4}$$

У цих рівняннях $x(k) \in \mathbf{R}^{n_x}$ є вектором стану, $u(k) \in \mathbf{R}^{n_u}$ – вектор вхідних даних, $a(k) \in \mathbf{R}^{n}$ – вектор. У даному випадку вектор стану не відображає реальні величини, а використовується для опису динаміки $a(k)$ порядок n_x визначається дослідником.

Алгоритми ідентифікації призначені для визначення невідомих параметрів $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n_x \times n_x}$, $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n_x \times n_u}$, $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{n \times n_x}$ у моделі (3), (4).

При синтезі системи керування з прогнозувальною моделлю модель (3), (4) може бути використана для прогнозування залежності між вхідними/вихідними даними та невідомих параметрів моделі на s-му кроці вперед. Для цього на кожному k-му кроці формується ряд прогнозованих значень $\{a(i)\}_{i=1}^{k+s-1}$ та розраховується залежність між входами і виходами з k -го по $k+s-1$ момент часу:

$$a_k^{k+s-1}(k) = O_s x(k) + T_s u_k^{k+s-1}(k)\,, \tag{5}$$

де

$$u_k^{k+s-1}(k) = col\{u(k), u(k+1), ..., u(k+s-1)\}$$
$$a_k^{k+s-1}(k) = col\{a(k), a(k+1), ..., a(k+s-1)\}$$

$$T_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \ddots & \cdots \\ C_a B_u & 0 & \ddots & \ddots \\ C_a A B_u & C_a B_u & \ddots & \ddots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots \\ C_a A^{s-2} B_u & C_a A^{s-3} B_u & \dots & C_a B_u \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$O_s = \begin{bmatrix} C_a \\ C_a A \\ C_a A^2 \\ \vdots \\ C_a A^{s-1} \end{bmatrix} \tag{7}$$

при $s \ge n_x$.

У рівнянні (5) невідомими залишаються O_s, T_s та $\mathbf{x}(k)$. З метою їх визначення перепишемо рівняння (5) для моментів часу $k = 0,1,..., K-1$:

$$Y_{0,s,K-1} = O_s X_{0,K-1} + T_s U_{0,s,K-1} \tag{8}$$

$$Y_{0,s,K-1} = \begin{bmatrix} \tilde{a}(0) & \tilde{a}(1) & \cdots & \tilde{a}(K-s) \\ \tilde{a}(1) & \tilde{a}(2) & \ddots & \tilde{a}(K-s+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}(s-1) & \tilde{a}(s) & \cdots & \tilde{a}(K-1) \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$X_{0,K-1} = \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(K-1) \end{bmatrix} \tag{10}$$

Елементи цих матриць є відомими. Подібно до $Y_{0,s,K-1}$ визначається і матриця $U_{0,s,K-1}$, яка теж відома. Виходячи з цього, алгоритм знаходження невідомих складається з таких кроків.

1. Знаходження $O_{s.}$ Для цього помножимо рівняння (8) на матрицю $F_{0,s,K-1} = I_K - U^{\mathrm{T}}_{0,s,K-1}(U_{0,s,K-1}U^{\mathrm{T}}_{0,s,K-1})^{-1}U_{0,s,K-1}$, яка визначається з умови $U_{0,s,K-1}F_{0,s,K} = 0$.

Тоді рівняння (8) набуває вигляду $Y_{0,s,K-1}F_{0,s,K-1} = O_s X_{0,K-1}F_{0,s,K-1}$, звідки знаходимо невідому O_s.

2. Визначення A та C_a із O_s, використовуючи (7).

3. Підстановка $\{u(k)\}_{k=1}^{K}$ та $\{\tilde{a}(k)\}_{k=1}^{K}$ у рівняння (3), (4) при $k = 0,1,..., K$ для визначення $x(k)$ та B_u.

Якщо параметри моделі $A, B, C_a,$ відомі, то рівняння (3), (4) можна використовувати для розрахунку і прогнозування змін у часі коефіцієнтів Фур'є, а, значить, і вектора змінних процесу $T(k)$ наступним чином:

$$\mathbf{T}(k) = \Phi_n a(k) = \underbrace{\Phi_n \mathbf{C}_a}_{\mathbf{C}_T} x(k) \tag{11}$$

З урахуванням (3), (4) та (11) загальна математична модель набуває вигляду:

$$x(k+1) = Ax(k) + B_u u(k)$$
$$a(k) = C_a x(k)$$
$$T(k) = C_T x(k)$$

Висновки

Для підвищення ефективності технологічних процесів промислових виробництв доцільно впроваджувати системи керування з прогнозувальною моделлю.

В рамках цього завдання для об'єктів з розподіленими параметрами потрібно розв'язати дві задачі: побудувати спрощену математичну модель об'єкта з розподіленими параметрами, яка у подальшому буде використана як прогнозувальна модель, та розробити ефективний метод параметричної ідентифікації даної моделі.

Саме ці питання розглянуті у даній статті. Як метод спрощення складної математичної моделі об'єктів з розподіленими параметрами використовується метод розділення змінних (метод Фур'є). Надалі спрощена модель представляється у вигляді математичної моделі у просторі станів. Запропонований алгоритм параметричної ідентифікації даної моделі.

Подальші дослідження мають бути на правлені на дослідження ефективності застосування запропонованих моделей та алгоритмів для розв'язання практичних задач керування об'єктів з розподіленим параметрами.

Список використаних джерел

[1] Чермак И. Динамика регулируемых систем в теплоэнергетике и химии / И. Чермак, В. Петерка, И. Заворка // Москва: Мир. - 1972. 618 с.
[2] Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов // М.: Наука. - 1976. 500 с.
[3] Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов // М.: Наука. - 1979. 394 с.
[4] Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами / Э.Я. Рапопорт // М.: Высшая школа. - 2003. 299 с.
[5] Бокс Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс // Выпуск 1. М., Мир. - 1974. 406 с.
[6] Finlay S. Predictive Analytics, Data Mining and Big Data. Myths, Misconceptions and Methods (1st ed.). Basingstoke: Palgrave Macmillan. - 2014. p. 237.
[7] Ивахненко А.Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей / А.Г. Ивахненко, Й.А. Мюллер // К.: Техніка и ФЕБ Ферлаг Техник (Берлин). - 1985. 223с. с илл.
[8] О.А. Жученко. Метод спрощення математичних моделей об'єктів керування із розподіленими параметрами / О. А. Жученко, В. С. Цапар // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. - 2015. - Vol. 7, № 1. - С. 15-25.
[9] Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях / С. А. Кабанов // – СПб: Изд-во С.-Петербургского университета. - 1997. – 200 с.
[10] Веремей Е. И. Введение в задачи управления на основе предсказаний / Е. И. Веремей, В. В. Еремеев. – 2007.
[11] Шевяков А. А. Управление тепловыми объектами с распределенными параметрами / А. А. Шевяков, Р. В. Яковлева // – Москва: Энергоатомиздат. - 1986. – 208 с.
[12] Девятов Б. Н. Теория и методы анализа управляемых распределенных процессов / Б. Н. Девятов, Н. Д. Демиденко // – Новосибирск: Наука, 1983. – 271 с.
[13] Бутковский А. Г. Теория оптимального управления системы с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский // – Москва: Наука, 1965. – 474 с.
[14] Васильева А. Б. Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений / А. Б. Васильева, В. Ф. Бутузов. – Москва: Высшая школа, 1990. – 208 с.
[15] Маковский В. А. Динамика металлургических объектов с распределенными параметрами / В. А. Маковский. – Москва: Металлургия. - 1971. – 384 с.
[16] Рей У. Методы управления технологическими процессами / У. Рей // – Москва: Мир. - 1983. – 368 с.
[17] Чермак И. Динамика регулируемых систем в теплоэнергетике и химии / И. Чермак, В. Паперка, И. Заворка // – Москва: Мир, 1972. – 623 с.
[18] Шевяков А. А. Инженерные методы расчета динамики теплообменных аппаратов / А. А. Шевяков, Р. В. Яковлева. – Москва: Машиностроение, 1968. – 314 с.

[19] Кошлаков Н. С. Уравнения в частных производных математической физики / Н. С. Кошлаков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов // – Москва: Наука, 1970. – 712 с.
[20] Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский // – Москва: Наука, 1966. – 735 с.
[21] Бутковский А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский // – Москва: Наука, 1975. – 568 с.
[22] Мартиненко Н. А. Конечные интегральные преобразования и их применение к исследованию систем с распределенными параметрами / Н. А. Мартиненко, Л. М. Пустыльников // – Москва: Наука, 1986. – 304 с.
[23] Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф // – Москва: Мир, 1975. – 683 с.

References

[1] Chermak Y., Peterka V., Zavorka Y. *Dynamyka rehulyruemykh system v teploenerhetyke y khymyy*. Moskva: Myr, 618 s., 1972.
[2] Kafarov V.V., Dorokhov Y.N. *Systemnyi analyz protsessov khymycheskoi tekhnolohyy*. Osnovy stratehyy. M.: Nauka,. 500 s., 1976.
[3] Kafarov V.V., Dorokhov Y.N. *Systemnyi analyz protsessov khymycheskoi tekhnolohyy*. Topolohycheskyi pryntsyp formalyzatsyy. M.: Nauka,. 394 s., 1979.
[4] Rapoport E.Ia. *Strukturnoe modelyrovanye obektov y system upravlenyia s raspredelennymy parametramy*. M.: Vysshaia shkola,. 299 s., 2003.
[5] Boks Dzh., Dzhenkyns H. *Analyz vremennykh riadov, prohnoz y upravlenye*. Vipusk 1. M., Myr,. 406 s., 1974.
[6] Finlay, Steven *Predictive Analytics, Data Mining and Big Data. Myths, Misconceptions and Methods* (1st ed.). Basingstoke: Palgrave Macmillan. p. 237., 2014.
[7] Yvakhnenko A.H., Miuller Y.A. *Samoorhanyzatsyia prohnozyruiushchykh modelei*. K.: Tekhnika y FEB Ferlah Tekhnyk (Berlyn), 223s. s yll., 1985.
[8] Zhuchenko O.A. *Metod sproshchennia matematychnykh modelei obiektiv keruvannia iz rozpodilenymy parametramy*. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv. - Vol. 7, № 1. - S. 15-25, 2015.
[9] Kabanov C. A. *Upravlenye systemamy na prohnozyruiushchykh modeliakh.* SPb: Yzd-vo S.-Peterburhskoho unyversyteta. – 200 s., 1997.
[10] Veremei E. Y., and Eremeev V.V. *Vvedenye v zadachy upravlenyia na osnove predskazanyi*. 2007.
[11] Sheviakov A. A., and Yakovleva R.V. *Upravlenye teplovymy obektamy s raspredelennymy parametramy*. Moskva: Enerhoatomyzdat,. – 208 s., 1986.
[12] Deviatov B. N., and Demydenko B.N. *Teoryia y metody analyza upravliaemykh raspredelennykh protsessov*. Novosybyrsk: Nauka,. – 271 s., 1983.
[13] Butkovskyi A. H. Teoryia optymalnoho upravlenyia systemy s raspredelennymy parametramy. Moskva: Nauka,. – 474 s., 1965.
[14] Vasyleva A. B., and Butuzov V.F. *Asymptotycheskye metody v teoryy synhuliarnykh vozmushchenyi*. Moskva: Vysshaia shkola, – 208 s., 1990.
[15] Makovskyi V. A. *Dynamyka metallurhycheskykh obektov s raspredelennymy parametramy*. Moskva: Metallurhyia, – 384 s., 1971.
[16] Rei U. *Metody upravlenyia tekhnolohycheskymy protsessamy*. Moskva: Myr. – 368 s., 1983.
[17] Chermak Y., Paperka V., Zavorka Y. *Dynamyka rehulyruemykh system v teploenerhetyke y khymyy*. Moskva: Myr. – 623 s., 1972.
[18] Sheviakov A. A., Yakovleva R.V. Ynzhenernye metody rascheta dynamyky teploobmennykh apparatov. Moskva: Mashynostroenye. – 314 s., 1968.
[19] Koshlakov N. S., Hlyner E.V., Smyrnov M. M. *Uravnenyia v chastnykh proyzvodnykh matematycheskoi fyzyky*. Moskva: Nauka. – 712 s., 1970.
[20] Tykhonov A. N., Samarskyi A. A. *Uravnenyia matematycheskoi fyzyky* / A. N. Tykhonov,. – Moskva: Nauka. – 735 s., 1966.
[21] Butkovskyi A. H. *Metody upravlenyia systemamy s raspredelennymy parametramy*. Moskva: Nauka. – 568 s., 1975.
[22] Martynenko N. A., Pustylnykov L. M. Konechnye yntehralnye preobrazovanyia y ykh prymenenye k yssledovanyiu system s raspredelennыmy parametramy. Moskva: Nauka. – 304 s., 1986.
[23] Eikkhoff P. Osnovy ydentyfykatsyy system upravlenyia. Moskva: Myr. – 683 s., 1975.