

УДК 681.5:624.7

DOI 10.31471/1993-9981-2024-2(53)-81-93

СИНТЕЗ ЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ МУФЕЛЬНОЇ ПЕЧІ

М. І. Горбійчук, А. М. Лазорів, М. І. Козуляк

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна; e-mail: gorb@nung.edu.ua*

Муфельні печі з двома незалежними джерелами живлення використовують для закалювання невеликих за розміром деталей. Для дослідження ступеня взаємовпливу між входами і виходами об'єкта використано матрицю Брістоля та комплексний коефіцієнт зв'язності. Отримані результати показали, що існують суттєві перехресні зв'язки між вхідними та вихідними величинами муфельної печі. Тому синтез систем автоматичного керування температурним режимом муфельної течі здійснено з врахуванням наявності перехресних зв'язків. Розроблено три варіанти систем керування температурним режимом муфельної печі. Перший варіант – багатоканальна одноконтурна САК за температурою в контрольних точках; другий варіант – багатоканальна гібридна одноконтурна САК за температурою в нижній контрольній точці та слідкуюча система за різницею температур в контрольних точках заготовки та третій варіант – автономна САК із розв'язанням перехресних каналів за допомогою зовнішнього коректора, який «ліквідує» вплив перехресних каналів і забезпечує автономне налаштування регуляторів. Проведений порівняльний аналіз розроблених САК методом імітаційного моделювання дав змогу встановити, що показники якості роботи синтезованих САК відповідають заявленим технічним вимогам як при стрибкоподібній, так і при програмній у часі зміні завдання.

Ключові слова: муфельна піч, перехресні зв'язки, системи керування, імітаційне керування, показники якості.

Muffle furnaces with two independent power sources are used for hardening small parts. To study the degree of mutual influence between the inputs and outputs of the object, the Bristol matrix and the complex coefficient of connectivity were used. The obtained results showed that there are significant cross-connections between the input and output values of the muffle furnace. Therefore, the synthesis of systems for automatic control of the temperature regime of the muffle flow was carried out taking into account the presence of cross connections. Three variants of muffle furnace temperature control systems have been developed. The first option is a multi-channel single-circuit SAC based on temperature at control points; the second option is a multi-channel hybrid single-circuit SAC based on the temperature at the lower control point and a tracking system based on the temperature difference in the control points of the workpiece, and the third option is an autonomous SAC with resolution of cross channels using an external corrector, which "eliminates" the influence of cross channels and provides autonomous adjusting the controls. The conducted comparative analysis of developed SACs by the method of simulation modeling made it possible to establish that the indicators of the quality of work of synthesized SACs meet the stated technical requirements both with a jump-like and with a program change in time of the task.

Keywords. muffle furnace, cross connections, control systems, simulation control, quality indicators.

Вступ

Муфельні печі – невеликі за розміром теплові об'єкти, які використовують як для проведення лабораторних досліджень, так і в промисловості для виготовлення невеликих за розміром деталей. Муфельна піч є апаратом періодичної дії. Технологічний режим муфельної печі включає в себе три фази: нагрівання печі до заданої температури (перша фаза), підтримання температури на заданому

рівні (робоча фаза) і охолодження печі (третя, завершальна фаза).

Муфельні печі живляться від електричного джерела енергії, до якого підключені нагрівальні елементи (тени), виготовлені з матеріалів з великим омичним опором.

У переважній більшості випадків муфельні печі мають одне джерело живлення, за допомогою якого здійснюється нагрівання електричних

елементів опору, і які створюють температурний режим у муфельній печі. У таких печах для стабілізації температури використовують одноканальні регулятори, які мають у своєму складі датчик температури, мікропроцесорний пристрій (контролер) і тиристорний виконавчий механізм. За допомогою останнього до нагрівача підводиться необхідна потужність.

У даній роботі розглядається тип муфельних печей, які мають два окремих джерела живлення, що зумовлює наявність двох каналів передачі керуючих впливів та породжує додаткові зв'язки, погіршуючи якість керування такими об'єктами.

За допомогою матриці Брістоля встановлено, що перехресні канали є рівносильними, і з урахуванням встановленого факту синтезовано три варіанти автоматичних систем керування температурним режимом муфельної печі, які показали хороші показники якості роботи як при стрибкоподібній, так і при поступовій зміні завдання.

Аналіз літературних джерел

Успішний синтез системи автоматичного керування технологічними процесами, зокрема тепловими, можливий за умови, якщо створено адекватну технологічному процесу математичну модель. Технологічні апарати, в яких протікають теплові процеси, є об'єктами з розподіленими параметрами [1]. Створення математичних моделей таких об'єктів можливе лише при певній ідеалізації об'єкта керування. Але, навіть за такої умови, математичні моделі є досить складними і малоприсадибними для вирішення задачі синтезу систем автоматичного керування. Так, наприклад, запропонована авторами [2] математична модель складається із шести диференціальних рівнянь у часткових похідних, які вміщують цілий ряд емпіричних коефіцієнтів, визначення яких вимагає значного обсягу експериментальних досліджень. Для спрощення математичного моделювання

муфельної печі без помітної втрати точності автор роботи [3] умовно розбив піч на 14 зон. Кожна з цих зон розглядається як деякий об'єкт із зосередженими параметрами. Такі моделі є малоприсадибними для цілей синтезу систем автоматичного керування через свою складність, які важко подати в термінах «вхід-вихід». Альтернативою аналітичного підходу є створення [4] емпіричних моделей муфельної печі з двома незалежними джерелами живлення на базі спланованого експериментального дослідження.

Сучасні системи автоматичного керування температурним режимом у муфельній печі будують на основі контролера, який реалізує ПІ- або ПІД-алгоритми керування [5]. Для запобігання перегріву печі при виході на робочий режим сучасні системи автоматичного керування температурою в муфельній печі мають у контурі керування елемент, який виконує функції відсікання струму [6].

Останнім часом увагу дослідників привертають нові методи синтезу систем керування температурними режимами в муфельних печах, засновані на ідеях штучного інтелекту. Так, у роботі [7] синтезована система автоматичного керування температурним режимом у муфельній печі з Fuzzy-регулятором та досліджені її властивості в середовищі MatLab/Simulink.

На теперішній час нечітке регулювання знаходиться на стадії теоретичних розробок, і поки що не знайшло широкого застосування для автоматичного керування технологічними процесами, зокрема тепловими. Зазвичай для автоматичного керування тепловими процесами застосовують класичні ПІ- та ПІД-алгоритми керування, що пояснюється високими їх експлуатаційними якостями.

У тому випадку, коли муфельна піч оснащена двома незалежними джерелами живлення, потрібні додаткові дослідження зі створення систем автоматичного керування з урахуванням наявності

перехресних зв'язків між виходами муфельної печі.

Метою роботи – є синтез систем автоматичного керування на основі створеної емпіричної моделі муфельної печі з двома незалежними джерелами живлення із врахуванням наявних перехресних зв'язків, а також якісна та кількісна оцінка ефективності їх функціонування.

Поставленої мети досягнуто шляхом розв'язання таких задач:

- розроблення основних структур систем автоматичного керування температурним режимом муфельної печі з двома незалежними джерелами живлення;

- створення імітаційної моделі розроблених структур систем автоматичного керування температурним режимом муфельної печі та проведення порівняльного аналізу ефективності їх функціонування;

- розроблення практичних аспектів реалізації системи автоматичного керування температурним режимом муфельної печі на базі мікропроцесорної техніки, інтегрованої в систему SCADA.

Виклад основного матеріалу

Муфельна піч з двома незалежними джерелами електричної енергії є об'єктом керування з двома входами і двома виходами, між якими існують перехресні зв'язки. Температурний режим у печі характеризується температурами в двох точках T_v і T_n (див. рис. 2), які повинні підтримуватись з високою точністю для отримання високоякісних заготовок.

Вимоги до синтезованої системи автоматичного керування температурним режимом муфельної печі визначаються технологічним регламентом, а саме:

Час нагрівання:

- до температури 300 °С не більше 1 год;

- до температури 600 °С не більше 1,5 год;

- до температури 800 °С не більше 2,5 год;

Величина перерегулювання не повинна перевищувати при нагріванні:

- до 400 °С - не більше 2 °С;

- до 600 °С – не більше 3 °С;

- від 600 °С до 800 °С – не більше 4 °С.

Розбіжність температури в контрольних точках та між профілем SP при виході на задану точку – не вища ± 2 °С.

Розбіжність між температурами в контрольних точках – не вища за 1 °С.

Регламентом передбачено достатньо жорсткі вимоги до спроектованих систем як за точністю підтримування температури, так і за часом виходу на температурний режим загартування. Тому необхідно провести детальні дослідження синтезованих АСР та оцінити ефективність кожної з них.

У роботі [4] отримано емпіричні моделі муфельної печі за кожним із чотирьох каналів передачі впливів від входу на її вихід (при зміні потужності по кожному входу $\Delta u = 40\%$). Параметри емпіричних моделей муфельної печі як об'єкта керування відображено у табл. 1.

Міру взаємозв'язку між входами та виходами об'єкта керування в статичному стані можна оцінити за допомогою матриці Брістоля [8]:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \cdots & \lambda_{ij} & \cdots \\ \lambda_{m1} & \cdots & \lambda_{mn} \end{bmatrix}.$$

Елементи матриці Λ визначаються за формулою:

$$\lambda_{ij} = [W_u(0)]_{ij} \cdot [W_u(0)^T]_{ij}^{-1},$$

де $W_u(0) = \lim_{s \rightarrow 0} W_u(s)$.

Матрична передавальна функція об'єкта керування має вигляд [9]:

$$W_u(s) = \begin{bmatrix} W_{11}(s) & W_{12}(s) \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) \end{bmatrix}.$$

З врахуванням параметрів передавальних функцій $W_{ij}(s)$ (табл. 1) отримаємо

Таблиця 1 – Параметри емпіричних моделей по каналах управління ($\Delta u = 40$)

Передавальні функції	k	$k^* = k/\Delta u$	Параметри чисельника ПФ			Параметри знаменника ПФ			
			b_0	b_1	b_2	a_0	a_1	a_2	a_3
$W_{11}(s)$	468.25	11.71	7828.23	97.77	1	559116.88	16854.16	206.53	1
$W_{12}(s)$	459.25	11.48	7724.32	97.20	1	612374.61	17821.93	211.50	1
$W_{21}(s)$	150,00	3.75	10401.34	136.80	1	1596016.46	34051.10	290.59	1
$W_{22}(s)$	172.88	4.322	9560.48	111.38	1	1133264.06	26531.02	254.91	1

$$W_u(0) = \begin{bmatrix} 11.71 & 11.48 \\ 3.75 & 4.322 \end{bmatrix}$$

і відповідно

$$\left[W_u(0)^T \right]^{-1} = \begin{bmatrix} 0.5716 & -0.496 \\ -1.518 & 1.5488 \end{bmatrix}.$$

Тоді матриця Брістоля буде такою:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 6.694 & -5.694 \\ -5.694 & 6.694 \end{bmatrix}.$$

Як бачимо, матриця Брістоля є симетричною з рівними діагональними елементами, які відмінні від одиниці, а недиагональні елементи не нульові. Отже, між каналами керування існують значні перехресні зв'язки, що необхідно врахувати при синтезі системи автоматичного керування.

В динамічному режимі для якісної оцінки взаємовпливу контурів керування використовується комплексний коефіцієнт зв'язаності $K_{36}(j\omega)$ [10]:

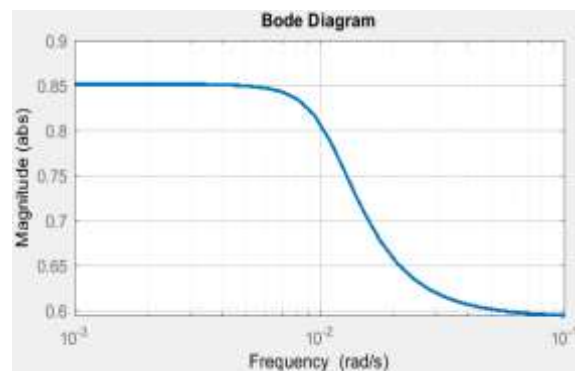
$$K_{36}(j\omega) = \frac{W_{12}(j\omega) \cdot W_{21}(j\omega)}{W_{22}(j\omega) \cdot W_{11}(j\omega)},$$

який обчислюють при $\omega = 0$, а також в робочому діапазоні частот.

В нашому випадку

$$K_{36}(s) = \frac{1.124 \cdot 10^{-6} s^6 + 1.479 \cdot 10^{-9} s^5 + 7.107 \cdot 10^{-13} s^4 + 1.598 \cdot 10^{-16} s^3 + 1.781 \cdot 10^{-20} s^2 + 1.297 \cdot 10^{-12} s^4 + 2.532 \cdot 10^{-16} s^3 + 2.542 \cdot 10^{-20} s^2 + 9.383 \cdot 10^{-25} s + 1.847 \cdot 10^{-29}}{1.239 \cdot 10^{-24} s + 2.285 \cdot 10^{-29}}. \quad (1)$$

Амплітудно-частотну характеристику $K_{36}(j\omega)$ наведено на рис. 1.

Рисунок 1 – Характеристика коефіцієнта зв'язаності $|K_{36}(j\omega)|$

Оскільки коефіцієнт зв'язаності у всьому діапазоні частот знаходиться в середині діапазону $[0 \dots 1]$ рад/с, то основні та перехресні канали є рівносильними, і необхідно синтезувати АСК з врахуванням перехресних зв'язків, що також підтверджено аналізом матриці Брістоля.

Тому принципово можна синтезувати системи автоматичного керування (САК) за трьома варіантами:

1) Багатоканальна одноконтурна САК за температурою в контрольних точках (рис. 2).

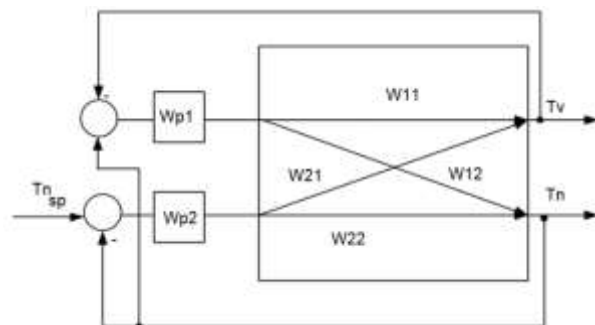


Рисунок 2 – Багатоканальна АСК за температурами в контрольних точках

При налаштуванні регуляторів необхідно враховувати вплив перехресних зв'язків.

2) Багатоканальна гібридна одноконтурна САК за температурою в нижній контрольній точці та відстежувальна система за різницею температур в контрольних точках заготовки (рис. 3).

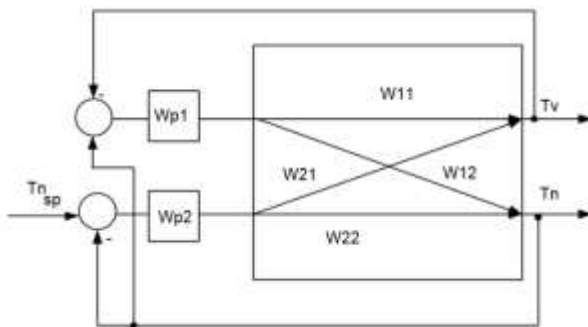


Рисунок 3 – Багатоканальна АСР за температурою та різницею температур в контрольних точках заготовки

Така структура характерна для даного об'єкта, оскільки температури в контрольних точках необхідно підтримувати на одному рівні з меншою розбіжністю при нагріванні за заданим профілем. Таким чином, регулятор $Wp2$ забезпечує формування необхідного температурного профілю, а $Wp1$ – балансує температури в контрольних точках.

3) Автономна САК з розв'язанням перехресних каналів за допомогою зовнішнього коректора [9, 11] (рис. 4).

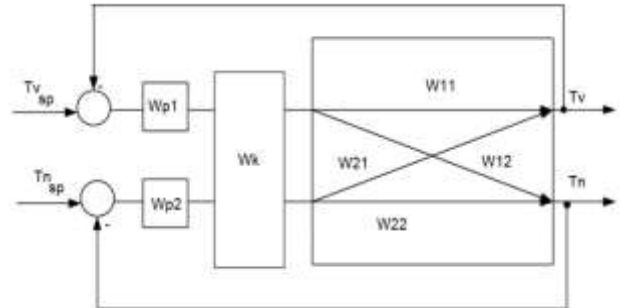


Рисунок 4 – Автономна АСР з коректором перехресних зв'язків об'єкта

Дана структура системи має коректор, який «ліквідує» вплив перехресних каналів і забезпечує автономне налаштування регуляторів.

Імітаційні моделі досліджуваних САК мають однакові базові елементи, які розглянемо на прикладі третього варіанту (рис. 5). Модель має у своєму складі *Sub*блок «Муфельна піч», в основі якого лежать отримані в [4] моделі об'єкта керування за відповідними каналами, два регулятори [12], вузли завдань, елементи контролю точності та візуалізації дослідження.

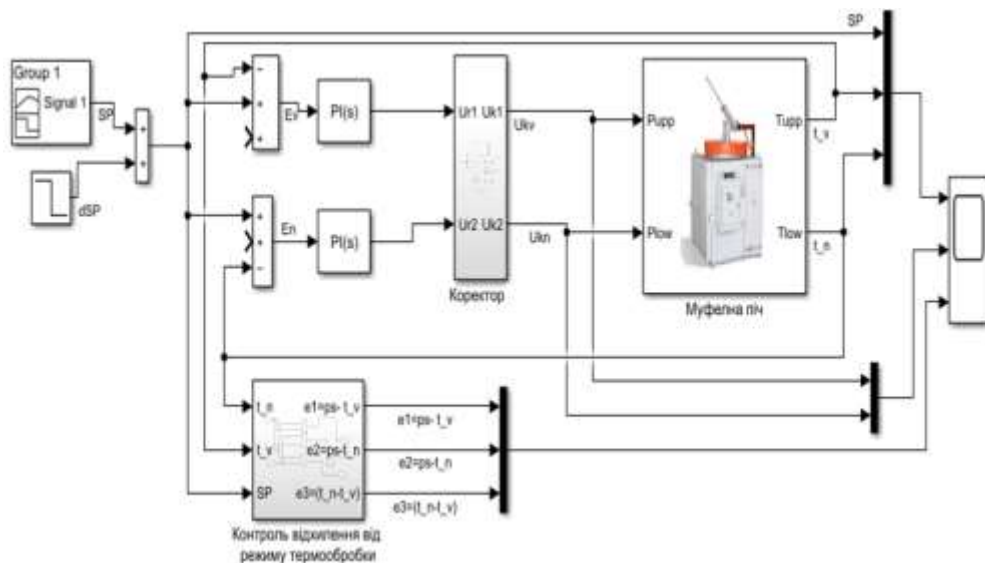


Рисунок 5 – Імітаційна модель досліджуваної АСК з компенсатором перехресних зв'язків

Завдання регуляторам формується за певним температурним профілем (рис. 6). Для аналізу відпрацювання САК при зміні завдання $SP(t)$ температурний профіль задавався з мінімальною швидкістю зміни ($V_{sp}^{min} = 5.33 \text{ }^\circ\text{C}/\text{хв}$). Мінімальна швидкість близька до обмеження, яке визначене регламентом.

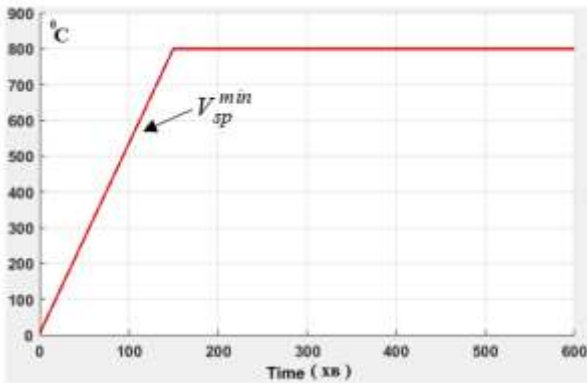


Рисунок 6 – Формування робочого профілю нагрівання заготовки для проведення досліджень

Оцінювались якісні показники роботи систем керування при стрибкоподібній зміні завдання, яке формувалось блоком *Step* (сигнал dSP) із зсувом в часі (рис. 6). Точка прикладання стрибкоподібного збурення 800 хв. з рівня 800 до 798 °C (рис. 7).

Для аналізу точності роботи системи керування створено додатковий блок контролю, який обчислює відхилення значення температур T_{low} і T_{upp} від заданого значення SP (рис. 5) та різницю температур e_3

$$e_1 = SP - T_{upp}; e_2 = SP - T_{low}; e_3 = T_{low} - T_{upp}.$$

Таким чином, можна контролювати відхилення температур T_{low} та T_{upp} від профілю та різницю температур між ними, адже ці параметри регламентуються режимом термічної обробки.

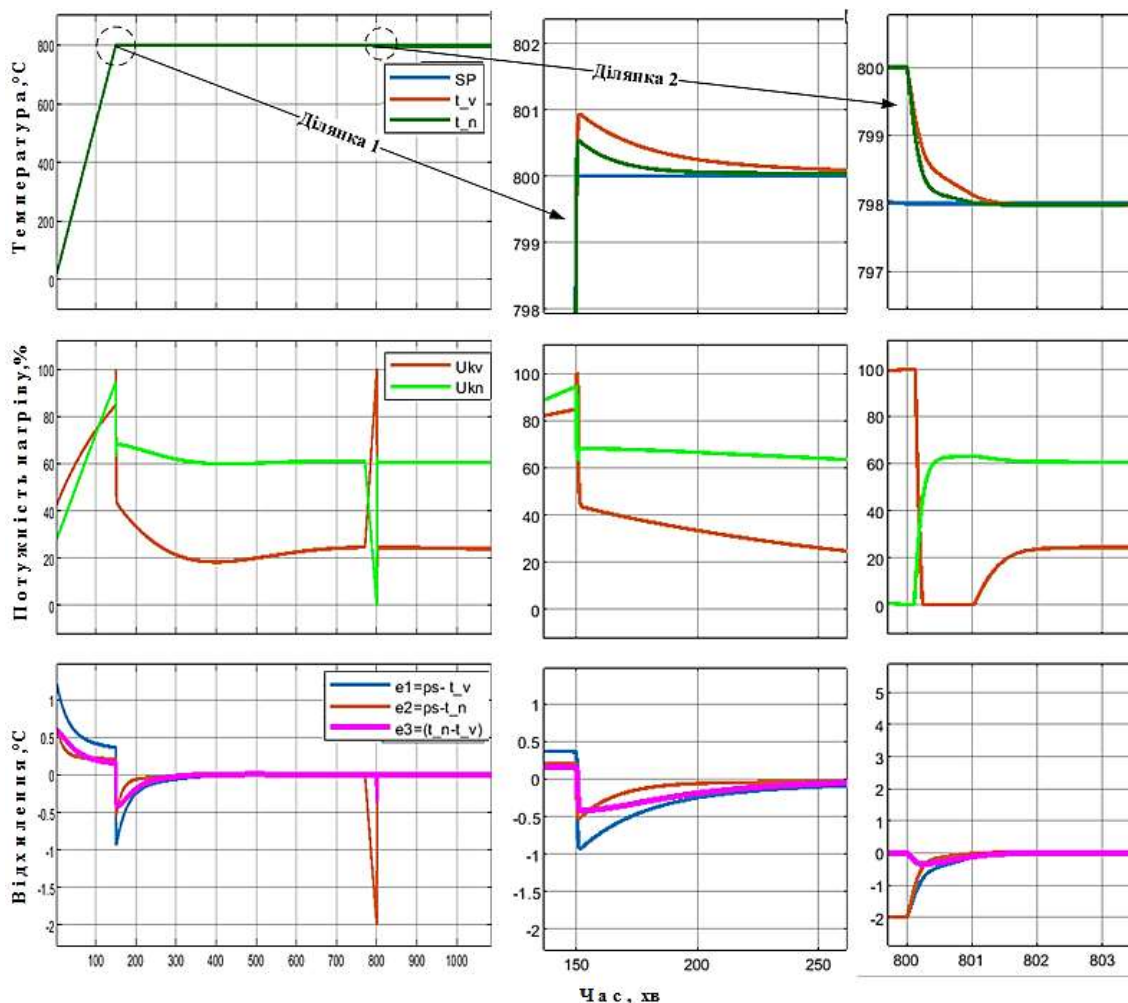


Рисунок 7 – Графічне представлення результатів дослідження автономної САК

Таблиця 2 – Налаштування та оцінка показників якості роботи САР

Параметри	Регулятор Wp1	Регулятор Wp2
Схема САК	Варіант 1	
Налаштування регулятора	P=81.5; I=11.8 хв ⁻¹ ; D=0; N=100	P=26.6; I=1.01 хв ⁻¹ ; D=0.029 хв; N=498
Час наростання, хв	0.66	0.5
Час регулювання, хв	6.34	0.86
Перерегулювання, %	3.55	0.35
Запас по амплітуді, dB	∞	∞
Запас по фазі, град.	87.4	90
Схема САК	Варіант 2	
Налаштування регулятора	P=181.7; I=3.48хв ⁻¹ ; D=0.0032хв; N=249.7	P=30.76; I=1.37хв ⁻¹ ; D=0.092хв; N=18.55
Час наростання, хв	1.1	0.37
Час регулювання, хв	1.79	0.55
Перерегулювання, %	0	1.98
Запас по амплітуді, dB	∞	∞
Запас по фазі, град.	90	85.9
Схема АСР	Варіант 3	
Налаштування регулятора	P=109.8; I=3.85 хв ⁻¹ ; D=0.159; N=457.6	P=42.5; I=2.59 хв ⁻¹ ; D=0.018 хв; N=797
Час наростання, хв	0.54	0.31
Час регулювання, хв	0.93	0.528
Перерегулювання, %	0.46	0.49
Запас по амплітуді, dB	∞	∞
Запас по фазі, град.	90	89.8

Даний перелік елементів є необхідним для реалізації імітаційних моделей САК для варіантів, зображених на рис. 2 і 3. Для реалізації автономної системи регулювання необхідний додатковий динамічний коректор (компенсатор перехресних зв'язків), який реалізований *Sub*блоком «Коректор» з використанням отриманих в [13] та спрощених в [14] залежностей, що ґрунтуються на дослідженнях розподілу енергії за станами на базі сингулярних чисел Ганкеля.

Для реалізації систем регулювання застосовуємо стандартний ПД-регулятор з паралельною структурою

$$W_p(s) = P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N(\frac{1}{s})},$$

де P, I, D, N – відповідно параметри налаштування пропорційної, інтегральної та диференційної складової регулятора.

Регулятори для всіх синтезованих систем попередньо налаштовували в додатку *PIDTuner* [15]. Для якісної роботи системи необхідне їх ручне підлаштування, оскільки процедура *PID Tuner* розрахована на оптимізацію при стрибкоподібних впливах. У нашому випадку профіль температури є функцією часу. Параметри налаштування ПД-регуляторів та показники якості роботи синтезованих систем регулювання при одиничному стрибкоподібному впливі зведені в табл. 2. Показники якості регулювання в табл. 2 вказані для режиму відпрацювання стрибкоподібної зміни завдання.

Графічну інтерпретацію результатів дослідження автономної системи регулювання (рис. 5) зображено на рис. 7. Окремі фрагменти роботи системи зображені на масштабованих рисунках праворуч: ділянка 1 – відпрацювання переходу з похилого треку на плато

Таблиця 3 – Параметри якості роботи САР з програмним пристроєм

Показники	Ділянка SP(t)	
	Похила (0-150хв)	Вихід на плато
Схема САК	Варіант 1	
Максимальне /середнє відхилення від SP, °C	0.9/0.5	0.65
Максимальна/середня розбіжність температур в контрольних точках, °C	0.7/0.5	0.35/0.1
Час виходу на усталене значення($\Delta=\pm 0.1^\circ\text{C}$) з опорної точки (800°C), хв.	-	70
Схема САК	Варіант 2	
Максимальне/середнє відхилення від SP, °C	1.2/0.5	0.7/0.2
Максимальна/середня розбіжність температур в контрольних точках, °C	0.22/0.15	0.12/0.08
Час виходу на усталене значення ($\Delta=\pm 0.1^\circ\text{C}$) з опорної точки(800°C), хв	-	102
Схема САК (спрощений компенсатор)	Варіант 3	
Максимальне відхилення від SP, °C	0.9/0.5	0.9/0.25
Максимальне розбіжність температур в контрольних точках, °C	0.6/0.25	0.4/0.1
Час виходу на усталене значення ($\Delta=\pm 0.1^\circ\text{C}$) з опорної точки (800°C), хв	-	100

профілю; ділянка 2 – реакція на стрибкоподібну зміну заданої температури (з 800 до 798 °C) за рахунок дії блоку *Step*. Як бачимо, синтезована автономна система добре відпрацьовує наростаючу ділянку набору температури (відхилення від профілю складає не більше 1 °C), час стабілізації температури при виході на плато не перевищує 100 хв., а при стрибкоподібній зміні завдання – не більше 1 хв.

Консолідовані показники якості для всіх варіантів реалізації синтезованих САК (рис. 2 – 4) за відгуком системи на стрибкоподібну зміну завдання зведені в табл. 2, а відпрацювання температурного профілю, який змінюється в часі – в табл. 3.

За всіма показниками при стандартному ступеневому збуренні за сигналом завдання синтезовані варіанти схем є працездатними і мають якісні показники роботи, які задовольняють вимогам технологічного регламенту.

Слід зазначити, що дещо кращі показники (табл. 2) за першими трьома параметрами має варіант 3 з використанням коректора. Однак слід підкреслити, що при значному

розбалансуванні ($>10^\circ\text{C}$) між заданим значенням та вимірним параметром компенсатор втрачає компенсаційні властивості за рахунок виходу керуючого сигналу на обмеження, які є технічно необхідними при керуванні потужністю нагрівання.

Аналіз показників якості роботи САР (табл. 3), де зведені параметри при відпрацюванні температурного профілю термообробки при роботі з програмним пристроєм, показує, що всі запропоновані варіанти можна рекомендувати для практичного використання.

Варіант 2 (багатоконтурна САК з відстежувальним контуром) краще підтримує рівність температур в контрольних точках (розбаланс між ними складає 0.12...0.15°C) впродовж всього температурного профілю, а це більше у 2–3 рази від інших схем за наближених інших показників. Час виходу на усталене значення при переході на плато профілю є меншим для варіанту 1 (70 хв. у порівнянні приблизно зі 100 хв. для інших варіантів).

Розглянемо технічні аспекти реалізації синтезованих систем керування та компенсаторів.

Для практичної реалізації компенсаторів скористаємось результатами дослідження [14, 16]. Редуковані моделі компенсаторів [16] представлені такими передавальними функціями:

$$\begin{aligned}
 w_{11}(s) &= \frac{2.452s^3 + 0.06121s^2 + 0.0007002s + 3.592 \cdot 10^{-6}}{s^3 + 0.01809s^2 + 0.0001535s + 5.341 \cdot 10^{-7}}; \\
 w_{12}(s) &= \frac{-0.3657s^3 - 0.01278s^2 - 0.0001804s - 1.069 \cdot 10^{-6}}{s^3 + 0.01861s^2 + 0.0001519s + 4.965 \cdot 10^{-7}}; \\
 w_{21}(s) &= \frac{-9.741s^3 - 0.1995s^2 - 0.002326s - 1.128 \cdot 10^{-5}}{s^3 + 0.01839s^2 + 0.00017s + 6.315 \cdot 10^{-7}}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Застосувавши методику, наведену в [16], перейдемо в дискретну область, використавши z -перетворення з часом квантування $t_0 = 1xв$. Після розкладання в паралельну форму [13] та подання виразу за степенями z^{-1} отримаємо залежності для технічної реалізації каналних компенсаторів.

Оскільки всі передавальні функції $w_{ij}(z)$ мають один простий і два комплексно-спряжені полюси, то подання буде складатись з вільного члена та двох рекурсивних ланок 2-го порядку, одна з яких вироджується у ланку першого порядку, тобто

$$w_{*}(z) = C^* + \frac{c_{11}^* \cdot z^{-1}}{1 + d_{11}^* \cdot z^{-1}} + \frac{c_{12}^* \cdot z^{-1} + c_{22}^* \cdot z^{-2}}{1 + d_{12}^* \cdot z^{-1} + d_{22}^* \cdot z^{-2}},$$

де * - модифікатор каналного коректора (ij); $C, c_0, \dots, c_2, d_0, \dots, d_2$ - коефіцієнти розкладу.

Співвідношення вхід/вихід лінійної дискретної системи однозначно пов'язане з його основною характеристикою в z -області і має вигляд лінійного різницевого рівняння:

$$\begin{aligned}
 y_*(n) &= y_*^0(n) + y_*^1(n) + y_*^2(n); \\
 y_*^0(n) &= C^* x_i(n); \\
 y_*^1(n) &= c_{11}^* x_i(n-1) - d_{11}^* y_*^1(n-1); \\
 y_*^2(n) &= c_{12}^* x_i(n-1) + c_{22}^* x_i(n-2) - d_{12}^* y_*^2(n-1) - d_{22}^* y_*^2(n-2).
 \end{aligned} \tag{3}$$

де $x(n) \dots x(n-2), y(n) \dots y(n-2)$ значення вхідного та вихідних сигналів на відповідному такті квантування.

Параметри представлення коректорів у паралельній формі відображено у табл. 4.

Таблиця 4 – Параметри розкладу в z -області для синтезованих компенсаторів з періоді квантування $1xв$

Параметр	Канальний компенсатор		
	$w_{11}(z) = w_{22}(z)$	$w_{12}(z)$	$w_{21}(z)$
C	2.4356	-0.3597	-9.7208
c_{11}	0.01759	-0.0079	-0.02419
d_{11}	-0.993	-0.993	-0.993
c_{12}	-0.000764	0.001929	0.003972
c_{22}	0.0008987	-	-
d_{12}	-1.989	-1.988	-1.989
d_{22}	0.989	0.9885	0.9887

Система керування муфельною піччю термообробки має тривірневу ієрархічну структуру (рис. 8.) і значна її частина реалізована на технічних засобах підприємства «Мікрол» (Україна) [12]. Верхній рівень SCADA системи – автоматизоване робоче місце персоналу на базі промислового комп'ютера та місцевої панелі оператора НМІ сМЕ-іV5 фірми Waintek. На цьому рівні розгорнута SCADA система SmartRevie з архівною станцією та мнемосхемою.

Середній рівень – рівень контролерів. Він представлений засобами регулювання (двоканальний програмний регулятор МІК-344-К7) для реалізації контурів регулювання температури відповідно до заданого профілю термообробки (реалізація рис. 2 та рис. 3). Регулятор має два послідовних інтерфейси RS-485 з

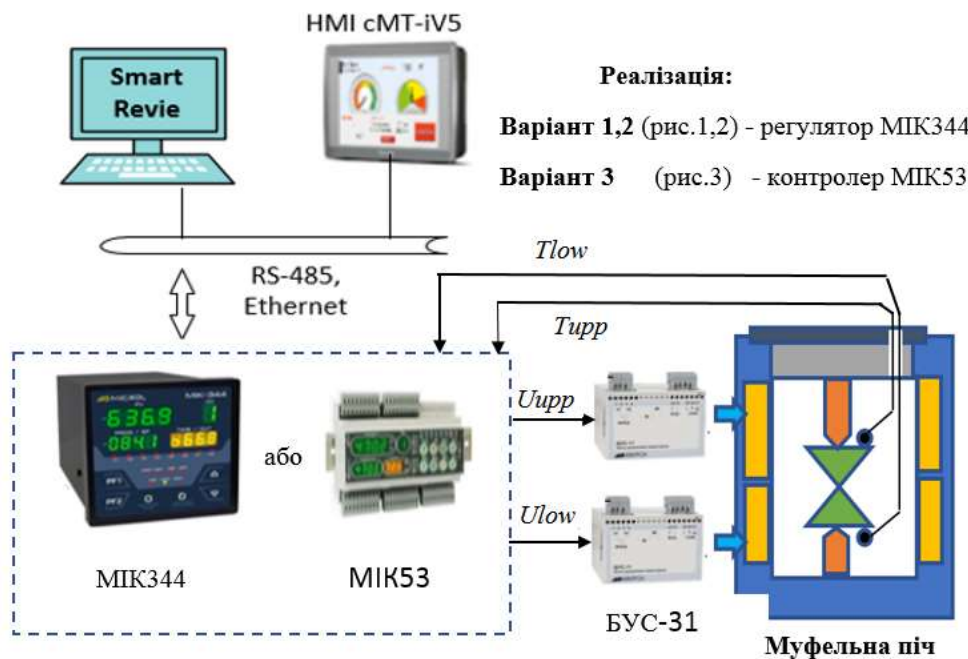


Рисунок 8 – Функціональна схема керування вузлом термічної обробки заготовок

протоколом зв'язку Modbus режим RTU (Remote Terminal Unit) та інтерфейс Ethernet з протоколом зв'язку - Modbus режим TCP (Slave). Крім того, точність вимірювання температури складає $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ТХА (К), що є важливою умовою застосування пристрою для підтримування температури в межах $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рівні контролерів для реалізації схеми рис. 4 доцільно застосувати PLC МІК-52Н з модулем розширення МР-51Н-11, що дозволить в одному пристрої, окрім програмних регуляторів, реалізувати також компенсатор. Але даний пристрій має дещо гірші метрологічні характеристики і володіє тільки одним інтерфейсним каналом RS-485 для організації цифрового обміну.

Нижній рівень системи представлений давачами контролю температури (термопары ТХА (К) з діапазоном вимірювання від мінус $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до плюс $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$) та виконавчими пристроями (симісторний підсилювач потужності БУС-31 з число-імпульсним керуванням та нагрівні тени).

Програмне забезпечення для контролера МІК-52 розробляється в інструментальній середовищі «Альфа»

мовою FBD. Спрощене функціонально блокове представлення програми користувача зображено на рис. 9.

Програма користувача ґрунтується на бібліотечних алгоритмах, що є основою функціональних блоків. Введення значення температур для контрольних точок здійснюється через блоки 1 (бібліотечний алгоритм *AIN*), які пов'язані з апаратною частиною вводу контролера і реалізують цифро-аналогове перетворення та забезпечують калібрування сигналу. Блок 2 відтворює функції програмного за датчика $SP(t)$ і формує профіль нагрівання заготовки в печі (основний алгоритми *PRG*), а базові точки треку задаються задатчиками SP_M та TM_M . На основі заданого SP та виміряного параметра PV у блоках 3 (алгоритм *PID*) реалізується ПІД-алгоритм керування, а на виходах регуляторів формуються сигнали U_{rv} , U_m , які є входами компенсаторів.

Типова спрощена функціональна схема канального компенсатора $w1(z)$ (рис. 9) реалізована у відповідності до різницевого рівняння (3). Вона містить блоки зсувних регістрів FIFO (алгоритм *AVRG*) та блоки 5 сумування з

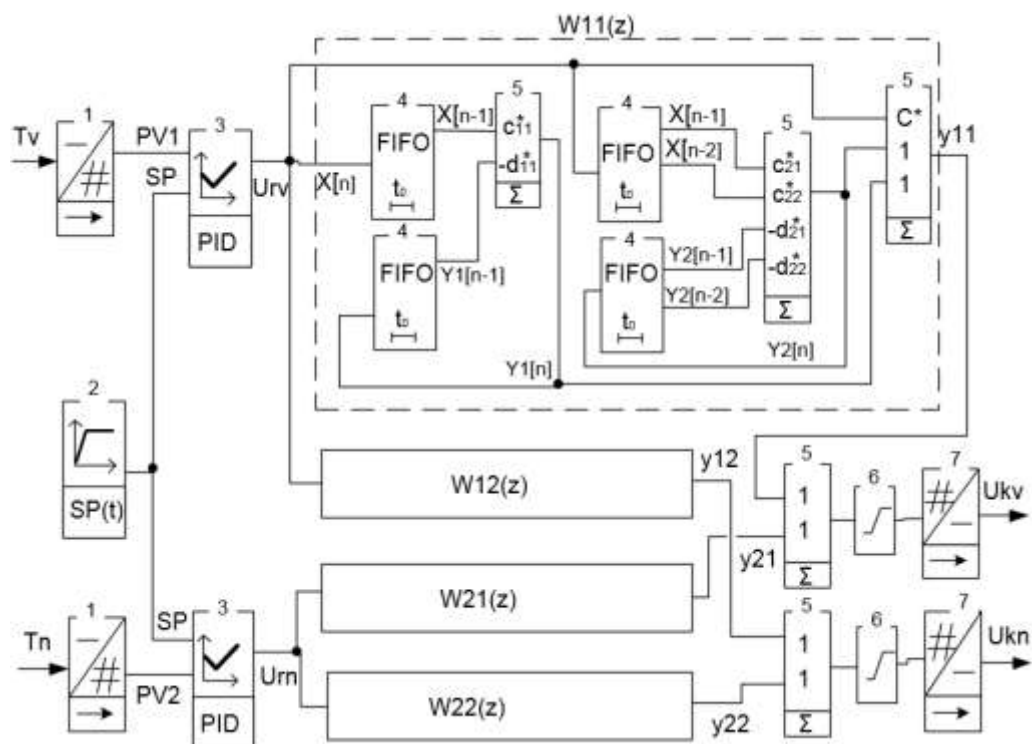


Рисунок 9 – Спрощена функціональна схема програми користувача регулювання температурного режиму у печі термообробки за третім варіантом

масштабуванням (алгоритм *SUMM*). В основі реалізації лежить програмна реалізація секцій 2-порядку детально розглянутих в [11]. Виходи основного та перехресного каналів компенсаторів після сумування та обмеження рівня сигналу в блоках 6 (алгоритм *LIMIT*) виводяться з контролера через блок 7 (алгоритм *AOT*). До даних виходів підключені блоки підсилення потужності БУС-31, які керують потужністю нагріву.

Висновки

1. За результатами аналізу матриці Брістоля та коефіцієнта зв'язності $K_{zg}(j\omega)$ встановлено, що об'єкт керування є багатозв'язним і має суттєві перехресні зв'язки між вихідними величинами муфельної печі як об'єкта автоматичного керування.

2. Синтезовано три варіанти реалізації САК температурним режимом печі та методом імітаційного моделювання, проведено їх дослідження. У результаті встановлено, що показники якості роботи синтезованих САК відповідають заявленим технічним вимогам як при

стрибокподібній, так і при програмній у часі зміні завдання. Всі розроблені варіанти САК можуть бути рекомендовані для практичної реалізації в цехах механічної обробки металевих виробів невеликих розмірів.

3. Запропонована структура SCADA системи, її технічна реалізація та програмне забезпечення контролера відповідають вимогам до системи керування температурним режимом термічної обробки металевих заготовок у муфельній печі та можуть знайти практичне застосування в промисловості.

Список використаних джерел

1. Степанюк Р. А. Спеціальні методи термічної підготовки: навч. посіб. Київ: НТУ «КПІ», 2023. 113 с.
2. Карвацький А.Я., Пулінець І.В., Шилович І.Л. Математична модель теплогидродинамічного стану багатоканальної печі при випалюванні електродних заготовок. *Східно-Європейський журнал передових технологій. Серія: Математика*

і кібернетика – фундаментальні та прикладні аспекти. 2012. Том 1. № 4(55). С. 33 – 37.

3. Lucák Jiří. A Mathematical Model of Thermal Processes in the Empty Electric Muffle Furnace. *Transactions on Electrical Engineering*, 2016. Vol. 5. No. 1. P. 14 -20.

4. Horbiychuk M.I., Lazoriv N.T., Kohutyk M. I., Manuliak I.Z. Experimental research on muffle furnace dynamic properties. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. No 3 (195). P. 144-150 .

5. Programmable Muffle Furnace Instruction Manual 650-750 Series. URL: https://archive-resources.coleparmer.com/Manual_pdfs/33856-15.pdf.

6. Карпенко Д. В. Розроблення автоматизованої системи керування лабораторної муфельної печі: кваліфікаційна робота. Харків: ХНУРЕ, 2021. 93с.

7. Intisar N. Al-Obaidi1. Design of fuzzy-pd controller for heating system temperature control. *Bilad Alrafidain Journal for Engineering Science and Technology*. URL: <https://dx.doi.org/xxxxx/bajest>.

8. Bristol E. On a new measure of interaction for multivariable process control. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1966. Vol. 11(1). P. 133–134. DOI: [10.1109/TAC.1966.1098266](https://doi.org/10.1109/TAC.1966.1098266)

9. Горбійчук М. І., Лазорів Н.Т., Когутяк М. І. Синтез автономної системи автоматичного керування температурним режимом муфельної печі. *Journal Věda a perspektivy*. 2023. № 2 (21) P. 387-407.

10. Штіфзон О.Й., Новіков П. В. Теорія автоматичного управління. Нелінійні та дискретні системи: Навчальний посібник: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2021. 98 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/9e481f55-c1f2-4e45-ba1e-81c21e0271b8/content>

11. Ray W.H. Advanced Process Control. URL: <https://www.scribd.com/document/262177338/Advanced-Process-Control-by-W-H-Ray>

12. URL: http://www.microl.ua/index.php?option=com_virtuemart&Itemid=71&lang=ru

13. Горбійчук М.І., Лазорів Н.Т., Когутяк М.І., Лазорів А.М. Дослідження динамічних властивостей компенсатора перехресних зв'язків автономної системи керування. *Методи та прилади контролю якості*. 2022. № 2(49). С. 74-88.

14. Горбійчук М.І., Лазорів Н.Т., Когутяк М.І., Лазорів А.М. Синтез оптимального за параметрами компенсатора перехресних зв'язків автономної системи керування. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. 2023. № 3. Том 34 (73). С.106 – 114.

15. PID Controller Tuning in Simulink URL: <https://nl.mathworks.com/help/slcontrol/gs/automated-tuning-of-simulink-pid-controller-block.html>

16. Горбійчук М., Когутяк М., Заячук Я. Практичні аспекти реалізації коректорів автоматичних систем керування. *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*. 2024. № 1. С. 101-110. DOI: [10.31891/2219-9365-2024-77-13](https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-13)

References

1. Stepaniuk R. A. Spetsialni metody termichnoi pidhotovky: navch. posib. Kyiv: NTU «KPI», 2023. 113 p. [in Ukrainian]

2. Karvatskyi A.Ia., Pulinets I.V., Shylovych I.L. Matematychna model teplo-hydrodynamichnoho stanu bahatokamernoї pechi pry vypaliuvanni elektrodnykh zahotovok. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. Seriia: Matematika i kibernetika – fundamentalni ta prykladni aspekty*. 2012. Vol. 1. No 4(55). P. 33 – 37. [in Ukrainian]

3. Lucák Jiří. A Mathematical Model of Thermal Processes in the Empty Electric Muffle Furnace. *Transactions on Electrical Engineering*, 2016. Vol. 5. No. 1. P. 14 -20.

4. Horbiychuk M. I., Lazoriv N.T., Kohutyk M. I., Manuliak I.Z. Experimental

research on muffle furnace dynamic properties. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. No 3 (195). P. 144-150.

5. Programmable Muffle Furnace Instruction Manual 650-750 Series. URL: https://archive-resources.coleparmer.com/Manual_pdfs/33856-15.pdf.

6. Karpenko D.V. Rozroblennia avtomatyzovanoi systemy keruvannia laboratornoi mufelnoi pechi: kvalifikatsiina robota. Kharkiv: KhNURE, 2021. 93p. [in Ukrainian]

7. Intisar N. Al-Obaidi1. Design of fuzzy-pd controller for heating system temperature control. *Bilad Alrafidain Journal for Engineering Scienceand Technology*. URL: <https://dx.doi.org/xxxxx/bajest>.

8. Bristol E. On a new measure of interaction for multivariable process control. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1966. Vol. 11(1). P. 133–134. DOI: [10.1109/TAC.1966.1098266](https://doi.org/10.1109/TAC.1966.1098266)

9. Horbiichuk M. I., Lazoriv N.T., Kohutiak M. I. Syntez avtonomnoi systemy avtomatychnoho keruvannia temperaturnym rezhymom mufelnoi pechi. *Journal Věda a perspektivy*. 2023. № 2 (21) P. 387-407. [in Ukrainian]

10. Shtifzon O.I., Novikov P. V. Teoriia avtomatychnoho upravlinnia. Neliniini ta dyskretni systemy. KPI im. Ihoria Sikorskoho. 2021. 98 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/9e481f55-c1f2-4e45-ba1e-81c21e0271b8/content> [in Ukrainian]

11. Ray W.H. Advanced Process Control. URL: <https://www.scribd.com/document/262177338/Advanced-Process-Control-by-W-H-Ray>

12. URL: http://www.microl.ua/index.php?option=com_virtuemart&Itemid=71&lang=ru

13. Horbiichuk M.I., Lazoriv N.T., Kohutiak M.I., Lazoriv A.M. Doslidzhennia dynamichnykh vlastyvostei kompensatora perekhresnykh zviazkiv avtonomnoi systemy keruvannia. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2022. No 2(49). P. 74-88. [in Ukrainian]

14. Horbiichuk M. I., Lazoriv N. T., Kohutiak M. I., Lazoriv A. M. Syntez optimalnoho za parametry kompensatora perekhresnykh zviazkiv avtonomnoi systemy keruvannia. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*. 2023. No 3. Vol. 34 (73). P. 106–114. [in Ukrainian]

15. PID Controller Tuning in Simulink URL: <https://nl.mathworks.com/help/slcontrol/gs/automated-tuning-of-simulink-pid-controller-block.html>

16. Horbiichuk M., Kohutiak M., Zaiachuk Ya. Praktychni aspekty realizatsii korektoriv avtomatychnykh system keruvannia. *Mizhnarodnyi naukovotekhnichniy zhurnal «Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh»*. 2024. No 1. P. 101-110. DOI: [10.31891/2219-9365-2024-77-13](https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-13) [in Ukrainian]

SYNTHESIS OF EFFICIENT SYSTEMS FOR CONTROLLING THE TEMPERATURE REGIME OF A MUFFLER FURNACE

M. I. Horbiichuk, A. M. Lazoriv,
M. I. Kohutiak

Ivano-Frankivsk National Technical
University of Oil and Gas;
15 Karpatska St., Ivano-Frankivsk, 76019,
Ukraine;
e-mail: gorb@nung.edu.ua