

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-39>

УДК 62-5:681.5

ГОРБІЙЧУК Михайло

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
<https://orcid.org/0000-0002-8586-1883>
mi_profgorb@ukr.net

ВАСИЛЕНЧУК Михайло

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
<https://orcid.org/0009-0008-9725-052X>
mischa.blaster@gmail.com

КОГУТЯК Мирослав

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
<https://orcid.org/0000-0003-0026-7744>
atp_kohutyak@ukr.net

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ НАГРІВАННЯ НАФТИ В ШЛЯХОВОМУ НАГРІВНИКУ

Нафту (газ) перед подачею їх споживачам або в трубопровідну мережу їх попередньо нагрівають в шляхових нагрівачах з проміжним теплоносієм з метою зменшення в'язкості нафти або для запобігання гідратоутворення, яке виникає внаслідок зниження тиску.

У статті поставлена задача синтезу каскадно-зв'язаної системи, в якій основний канал «витрата паливного газу – температура нафти на виході нагрівача», а допоміжний «витрата паливного газу-температура димових газів».

Задача синтезу системи автоматичного керування розв'язана на основі створеної лінеаризованої математичної моделі, аналіз якої показав, що передавальна функція такої системи має дев'ятнадцятий порядок. Такий високий порядок передавальної функції унеможлиблює синтез системи з використанням узагальненого квадратичного критерію. Тому з використанням методу Генкеля і методу площ отримані редуковані передавальні функції за основним і допоміжними каналами системи керування. Це дало змогу знизити порядок передавальної функції похибки керування відносно завдання основного регулятора до шостого порядку. Синтезована структура системи керування має у своєму складі ПІ-регулятор (основний контур) і П-регулятор (допоміжний контур). Задача обчислення параметрів налаштування ПІ- та П-регуляторів сформульована як задача нелінійного програмування з узагальненим квадратичним критерієм та обмеженнями, які впливають із стійкості системи керування. За допомогою програмного забезпечення розробленого в середовищі MatLab розраховані параметри налаштування ПІ- та П-регуляторів та оцінена якість процесу керування тепловим режимом шляхового нагрівника з проміжним теплоносієм.

Ключові слова. Шляховий нагрівач, нафта, математична модель, редукція, система керування, регулятори, параметри налаштування, якість процесу.

HORBIICHUK Mykhailo, VASYLENCHUK Mykhailo, KOHUTIAK Miroslav

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF THE OIL HEATING PROCESS IN THE WAY HEATER

Oil (gas) is preheated in inline heaters with an intermediate heat carrier before being supplied to consumers or the pipeline network to reduce oil viscosity or prevent hydrate formation caused by pressure reduction.

The article addresses the problem of synthesizing a cascaded system where the primary channel is "fuel gas flow rate – oil temperature at the heater outlet," and the auxiliary channel is "fuel gas flow rate – flue gas temperature."

The control system synthesis problem was solved based on a linearized mathematical model, the analysis of which showed that the transfer function of such a system is of the nineteenth order. Such a high order of the transfer function makes it impossible to synthesize the system using a generalized quadratic criterion. Therefore, using the Hankel method and the area method, reduced transfer functions were obtained for the main and auxiliary control system channels. This allowed reducing the order of the control error transfer function relative to the main regulator's target to the sixth order.

The synthesized control system structure includes a PI-controller (main loop) and a P-controller (auxiliary loop). The task of calculating the PI and P controller tuning parameters was formulated as a nonlinear programming problem with a generalized quadratic criterion and constraints arising from the stability of the control system. Using software developed in the MatLab environment, the PI and P controller tuning parameters were calculated, and the quality of the control process for the thermal regime of the inline heater with an intermediate heat carrier was assessed.

Key words: Road heater, oil, mathematical model, reduction, control system, regulators, setting parameters, process quality.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Перед подачею нафти і газу споживачем або в трубопровідну систему їх попередньо нагрівають з метою зменшення експлуатаційних затрат або для запобігання гідратоутворення після пониження тиску газу.

На відміну від прямого нагріву нафти і газу у шляхових нагрівачах тепло, яке утворюється внаслідок згорання природного газу, передається робочому продукту через проміжний теплоносіє (воду), який заповнює ванну. Тека технологічна схема нагріву робочого тіла виключає прямий контакт продукту з жаровими трубами печі, через які протікає робоче тіло, що, на відміну від прямого нагріву нафти (газу), запобігає появі локальних гарячих ділянок, наявність яких може бути причиною деградації технологічної обладнання та спричинити розриви жарових труб і, як наслідок, витіки продукту та вибухи.

Нафта або газ на виході нагрівника повинні мати певну стабільну температуру, яка здебільшого підтримується одноконтурною системою автоматичного керування. З огляду на те, що об'єкт керування по каналу «витрата паливного газу-температура робочого продукту на виході» має значну інерційність такі системи є малоефективні.

Ефективність системи автоматичного керування можна значно підвищити, якщо використовувати додаткову інформацію про динамічні властивості каналу «витрата природного газу-температура димових газів».

Отже, метою роботи є синтез каскадно-зв'язаної системи автоматичного керування процесом нагріву нафти в шляховому нагрівачі та оцінка якості процесу керування синтезованої системи.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Більшість робіт [1-4], у яких розглядається проблематика аналізу роботи шляхових нагрівачів присвячена питанням покращення процесу передачі тепла від жарових труб печі до робочого тіла (нафта або газ), яке протікає через пучок труб, розміщених у ванні з водою.

Оскільки ванна з водою займає значний об'єм і вода у порівнянні з металом має менший коефіцієнт теплопровідності [5], то зусилля певного числа дослідників були направлені на збільшення коефіцієнта теплопровідності рідини, що заповнює ванну нагрівача.

У роботі [6] проводились експериментальні дослідження впливу наночастинок на теплопровідність і в'язкість води. З цією метою був сконструйований експериментальний пристрій, Потім була перевірена його ефективність шляхом додавання багатостінних вуглецевих нанотрубок до рідин на основі етиленгліколю та води. Результати експериментальних досліджень показали, що коефіцієнт теплопровідності рідини збільшується з ростом температури, але не показує істотних змін зі збільшення частки нанофлуїдів.

Автори роботи [7] вказують на низьку ефективність шляхових нагрівачів з водяною банею. З метою дослідження впливу ультразвуку на ефективність роботи шляхових нагрівачів проводились експериментальні дослідження, які дали змогу виявити, що є позитивний вплив на збільшення коефіцієнта теплопередачі у залежності від потужності ультразвуку.

На основі комплексної моделі [8] для непрямого нагрівача на станції зниження тиску природного газу, досліджено вплив температури і підвищення тиску газу на вході нагрівача, потовщення ізоляції зі скловати і збільшення радіусу жарової труби на коефіцієнт корисної дії (ККД) нагрівача. Автори стверджують, що підбором оптимальних параметрів нагрівача є можливість збільшити ККД нагрівача з 20 % до 60%.

Стаття [9] присвячена термодинамічному моделюванню непрямого нагрівника з водяною банею з метою підвищення його ККД. Результати досліджень показали, що використання вихлопних продуктів згорання для попереднього підігріву повітря для горіння може підвищити термічний ККД системи з 46,36% (для базового варіанту) до 73,84%.

Система автоматичного керування роботою шляхового нагрівача природного газу, яка запропонована у роботі [10], має у своєму складі комп'ютер, який розраховує температуру гідратуутворення в перерахунок на вхідний тиск і передає цю інформацію для регулювання витрати газу на факелі камери згорання. Результати досліджень показують, що використання запропонованої системи автоматичного керування зменшують витрати паливного газу та викиди парникових газів.

Таким чином, більшість публікацій, присвячених проблематиці дослідження ефективності роботи шляхових нагрівачів нафти і природного газу присвячена вирішенню технологічних задач таких як підвищення коефіцієнта теплопровідності проміжного теплоносія (води), збільшення ККД та зменшення шкідливих викидів в атмосферу. Для забезпечення стабільної роботи шляхового нагрівача використовують одноконтурні системи керування. З огляду на значну інерційність керованого об'єкта такі системи мають низькі показники якості керування.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Тому метою роботи є синтез системи автоматичного керування нагрівачем нафти з проміжним теплоносієм, що досягається використанням додаткового інформаційного каналу «витрата паливного газу-температура димових газів».

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Перед подачею нафти (або конденсату) споживачам, нафту попередньо нагрівають до певної температури. Нагрів нафти здійснюється в апаратах, які представляють собою ємність (ванну), заповненою водою, яка омиває жарові труби. Через жарові труби протікають нагріті продукти згорання газу, який спалюється в камері згорання. Тепло від жарових труб передається рідині (воді), яка нагріває пучок труб, через які протікає нафта (конденсат).

Використання ванни з водою забезпечує рівномірне нагрівання продукту та запобігає появі аномально гарячих ділянок, які можуть бути причиною виникнення аварійних ситуацій – розривів труб, витікання нафти, вибухів.

Для підтримання технологічного процесу – нагріву робочого продукту – в заданих межах використовують локальну систему автоматичного регулювання температури продукту на виході нагрівника. Недоліком такої системи є те, що зовнішні збурення, які діють на об'єкт, враховуються системою за допомогою від'ємного зворотного зв'язку. Оскільки об'єкт має значну інерційність, то опосередковане врахування системою зовнішніх впливів приводить до значного погіршення якості процесу керування.

Тому актуальною є задача синтезу системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти у шляховому нагрівнику, яка повинна спиратись на адекватну математичну модель, і мати кращі, у порівнянні з існуючими системами, показники якості процесу керування.

У роботі [11] показано, що при зроблених таких допущеннях:

- продуктової теплообмінник і газохід замінюється зосередженою ланкою у якій поверхні обміну, товщина і маса металу стінок відповідають цим же параметрам реальних елементів підігрівника;
- температура середовищ у продуктовому змійовику та газоході дорівнює середній температурі середовищ на вході і виході даних елементів, а у ванні з теплоносієм середньому значенню діапазону паспортних робочих температур;
- передача тепла через поверхні теплообміну продуктового змійовика та від стінки газоходу до теплоносія відбувається шляхом конвекції, а від димових газів до стінки газоходу – радіантним та конвекційним способами;
- тепловий опір теплообмінних стінок дуже малий, тому їх температура в усіх точках однакова;
- густина середовищ і матеріалу стінок є постійною і не залежить від температури.

Динамічні властивості нагрівника у термінах «вхід-вихід» описуються шістьма передавальними функціями (рис.1). *a*

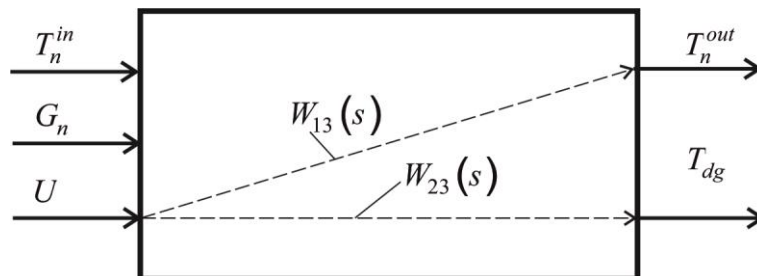


Рис.1. Структурно-параметрична схема шляхового нагрівника

На структурній схемі (рис. 1) - θ_n^{in} , g_n і u - відхилення вхідних величин – температури і витрати нафти та витрати паливного газу від своїх ustalених значень; θ_n^{out} і θ_{dg} - відхилення вихідних величин – температур нафти на виході із нагрівника і димових газів від своїх ustalених значень.

Задачею системи автоматичного керування нагрівником є підтримання на заданому рівні температури T_n^{out} нагрівника. Для цієї цілі служить канал $U - T_n^{out}$ (рис.1). Оскільки об'єкт керування

перебуває під впливом завад θ_n^{in} і g_n , то для покращення якості процесу керування слід використати додаткову інформацію, яка отримана в процесі математичного моделювання нагрівника, як об'єкта автоматичного керування [12]. Одним із способів покращення якості процесу керування є використання каскадно-зв'язаної системи автоматичного керування, які застосовують у тих випадках, коли є значна інерційність основного каналу регулювання і коли є можливість контролю допоміжної координати об'єкта, який відгукується на збурення з меншим запізненням, ніж регульована величина.

На рис.2 зображені перехідні характеристики, які отримані по каналах: ступінь відкриття регулюючого органу U - температура продукту на виході θ_n^{out} та ступінь відкриття регулюючого органу U

- температура димових газів θ_{dg} . Каналу $u - \theta_n^{out}$ відповідає передавальна функція $W_{13}(s)$, а канал $u - \theta_{dg}$ характеризується передавальною функцією $W_{23}(s)$. Для побудови перехідних характеристик за передавальними функціями $W_{13}(s)$ і $W_{23}(s)$ використані дані із роботи [13].

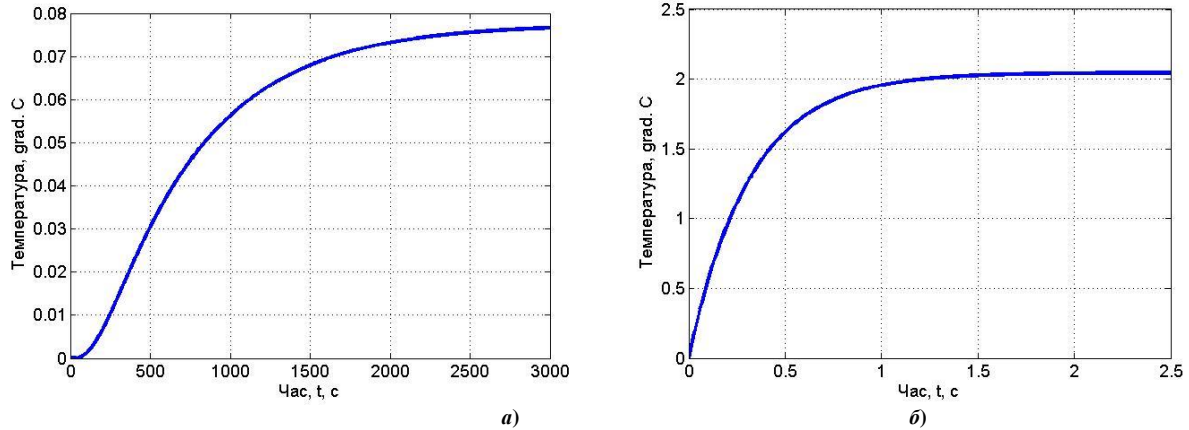


Рис. 2. Перехідні характеристики нагрівача:

а) по каналу $u - \theta_n^{out}$; б) по каналу $u - \theta_{dg}$

Аналіз перехідних характеристик (рис.2) показує, що із двох вихідних координат об'єкта (нагрівника) $u - \theta_n^{out}$ і $u - \theta_{dg}$ значно меншу інерційність має канал $u - \theta_{dg}$, який використаний як допоміжна координата у каскадно-зв'язаній системі автоматичного керування процесом нагрівання нафти у шляховому нагрівнику (рис.3).

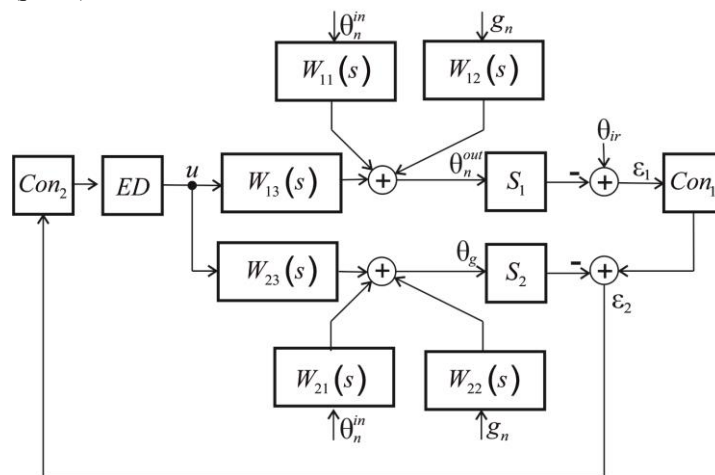


Рис. 3. Каскадно-зв'язана система автоматичного керування процесом нагрівання нафти

Каскадно-зв'язана система, яка зображена на рис. 2, має у своєму складі два регулятори – основний Con_1 і допоміжний Con_2 . Сигнал основного регулятора Con_1 подається на допоміжний регулятор Con_2 як завдання, а регулятор Con_1 має незалежне завдання θ_{ir} . До складу системи (рис. 2) входять давачі температури S_1 і S_2 , а також виконавчий пристрій ED , який здійснює керуючу дію з метою підтримання постійного значення температури на виході шляхового нагрівника.

Допускаємо, що вибрані регулятори Con_1 і Con_2 , які реалізують ПІ-алгоритм керування і мають відповідно такі передавальні функції:

$$W_{cn,1}(s) = \frac{C_0^{(1)}s + C_1^{(1)}}{s}, \quad (1)$$

$$W_{cn,2}(s) = \frac{C_0^{(2)}s + C_1^{(2)}}{s}, \quad (2)$$

де $C_0^{(1)}$, $C_1^{(1)}$, $C_0^{(2)}$ і $C_1^{(2)}$ - параметри налаштування Con_1 і Con_2 регуляторів.

Оскільки канал «ступінь відкриття регулюючого органу u - температура робочого продукту на виході нагрівника θ_n^{out} » мають значну інерційність [12] у порівнянні з інерційністю давача S_1 , то такий давач будемо вважати безінерційними з коефіцієнтами передачі $k_{S,1}$. Канал «ступінь відкриття регулюючого органу u - температура димових газів θ_{dg} » є малоінерційним і його параметри співставні з постійними часу давача S_2 . Тому динамічні властивості давача S_2 будемо характеризувати передавальною функцією $W_{sr}(s)$. Для передавальної функції виконавчого пристрою ED (рис. 3) прийнято таке позначення: $W_{ED}(s)$.

Поставимо таку задачу: знайти такі параметри налаштування $C_0^{(1)}$, $C_1^{(1)}$, $C_0^{(2)}$ і $C_1^{(2)}$ регуляторів Con_1 і Con_2 , щоб узагальнений квадратичний критерій [14]

$$J = \int_0^{\infty} (\varepsilon_1(t) + \tau^2 \dot{\varepsilon}_1^2(t)) dt, \quad (3)$$

де τ – постійна величина, набув би мінімального значення.

Для знаходження значення J визначимо величину неузгодженості $\varepsilon_1(t)$ (рис. 3). Методика обчислення J ґрунтується на знанні передавальної функції ε_1 відносно завдання θ_{ir} . Функцію $W_{\varepsilon_{\theta_{ir}}}(s)$ знайдемо, спираючись на принцип суперпозиції, прирівнявши до нуля величини θ_n^{in} і g_n . У результаті отримаємо структуру, яка зображена на рис. 4, у якій вихідною величиною є похибка неузгодженості ε_1 , а вхідною – завдання θ_{ir} основному регулятору Con_1 .

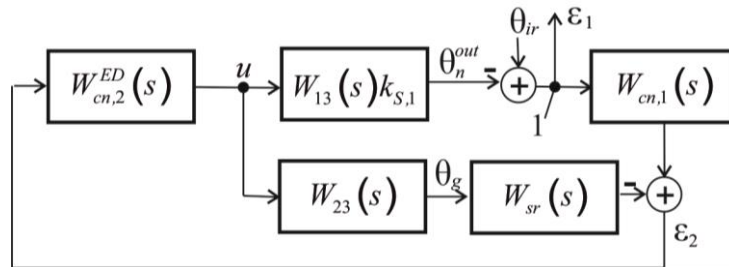


Рис. 3. Структурна схема системи керування за каналом «завдання регулятору-величина неузгодженості»

Перенісши вузол 1 за ходом сигналу через передавальну функцію $W_{cn,1}(s)$, і після ряду структурних перетворень отримаємо передавальну функцію $W_{\varepsilon_{\theta_{ir}}}(s)$ похибки неузгодженості

$$W_{\varepsilon_{\theta_{ir}}}(s) = \frac{1 + W_{cn,2}^{ED}(s)W_{23}^{sr}(s)}{1 + W_{cn,2}^{ED}(s)(W_{23}^{sr}(s) + W_{13}(s)W_{cn,1}(s)k_{S,1})}, \quad (4)$$

де $W_{cn,2}^{ED}(s) = W_{ED}(s)W_{cn,2}(s)$; $W_{23}^{sr}(s) = W_{23}(s)W_{sr}(s)$

Перш ніж обчислювати значення J за формулою (3), дослідимо порядок передавальної функції $W_{\varepsilon_{\theta_{ir}}}(s)$ (у подальшому для скорочення письма аргумент s опускаємо).

Для регулювання подачі газу у паливного камеру нагрівника використаний пневматичний виконавчий пристрій з позиціонером, який керує клапаном. Наявність позиціонера дозволяє завершити

перехідний процес менше ніж за 0,5 с. Оскільки вибрана лінійна характеристику регулюючого органу, то весь клапан можна вважати пропорційною ланкою, тобто

$$W_{ED}(s) = k_{ED}. \quad (5)$$

Отже,

$$W_{cn,2}^{ED}(s) = \frac{k_{ED}(C_0^{(2)}s + C_1^{(2)})}{s}.$$

Спираючись на дослідження авторів роботи [15], можна стверджувати, що динамічні властивості датчика температури можна описати такою передавальною функцією:

$$W_{sr}(s) = \frac{k_{sr}}{T_{sr}s + 1}.$$

$$\text{Введемо такі позначення: } W_{cn,2}^{ED} = \frac{R_{ED}}{s}; \quad W_{23} = \frac{R_{23}}{Q_{23}}; \quad W_{13} = \frac{R_{13}}{Q_{13}}; \quad W_{cn,1} = \frac{R_{cn,1}}{s};$$

$$W_{23}^{sr} = \frac{R_{23}^{sr}}{Q_{23}^{sr}}, \text{ де } R_{ED} = k_{ED}(C_0^{(2)}s + C_1^{(2)}); \quad R_{cn,1} = C_0^{(1)}s + C_1^{(1)}.$$

Тоді з врахуванням прийнятих позначень рівняння (4) набуде такого вигляду:

$$W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s) = \frac{(sQ_{23}^{sr}Q_{13} + R_{ED}R_{23}^{sr}Q_{13})s}{Q_{23}^{sr}Q_{13}s^2 + R_{23}^{sr}R_{ED}Q_{13}s + R_{13}R_{cn,1}R_{ED}Q_{23}^{sr}k_{S,1}}, \quad (6)$$

Визначимо порядки поліномів чисельника і знаменника передавальної функції $W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s)$, тобто $\deg(W_{\varepsilon\theta_{ir}})$.

Очевидно, що $\deg(R_{ED}) = \deg(R_{cn,1}) = 1$. Допускаємо, що $\deg(R_{13}) = m_{13}$, $\deg(R_{23}^{sr}) = m_{23}$, $\deg(Q_{13}) = n_{13}$, $\deg(Q_{23}^{sr}) = n_{23} + 1$, де $\deg(Q_{23}) = n_{23}$. Для реальних систем виконуються співвідношення: $m_{13} \leq n_{13}$ і $m_{23} \leq n_{23}$.

Відомо [16], що множення двох або більше поліномів приводить до давання їх порядків, а при додаванні двох або більше поліномів порядок суми поліномів визначається найбільшим порядком полінома у сумі.

Із формули (6) випливає, що чисельник R_w є таким: $R_w = Q_{23}^{sr}Q_{13}s^2 + R_{ED}R_{23}^{sr}Q_{13}s$, а знаменник Q_w має такий вигляд: $Q_w = Q_{23}^{sr}Q_{13}s^2 + R_{23}^{sr}R_{ED}Q_{13}s + R_{13}R_{cn,1}R_{ED}Q_{23}^{sr}k_{S,1}$.

Отже,

$$\deg(Q_{23}^{sr}Q_{13}s^2) = 3 + n_{13} + n_{23};$$

$$\deg(R_{ED}R_{23}^{sr}Q_{13}s) = 2 + m_{23} + n_{13}.$$

Оскільки виконується умова фізичної реалізації, то

$$\deg(R_w) = 3 + n_{13} + n_{23}.$$

Тепер визначимо порядок полінома знаменника передавальної функції $W_{\varepsilon\theta_{ir}}$. Маємо

$$\deg(Q_{23}^{sr}Q_{13}s^2) = 3 + n_{13} + n_{23},$$

$$\deg(R_{23}^{sr}R_{ED}Q_{13}s) = 2 + m_{23} + n_{13},$$

$$\deg(R_{13}R_{cn,1}R_{ED}Q_{23}^{sr}k_{S,1}) = 3 + m_{13} + n_{23}.$$

Виходячи із умови фізичної реалізації, приходимо до висновку, що

$$\deg(Q_w) = 3 + n_{13} + n_{23}.$$

Проведені дослідження [13] показали, що $m_{13} = 3$, $m_{23} = 7$, $n_{13} = n_{23} = 8$.

Тоді $\deg(R_w) = 19$, а $\deg(Q_w) = 19$. Такий високий порядок передавальної функції $W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s)$ приводить до надто громіздких обчислень узагальненого квадратичного критерію J , який малопридатний до практичного використання.

З метою подальшого пониження порядку передавальної функції $W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s)$ в додатковому контурі ПІ-регулятор замінимо на П-регулятор. Тоді

$$W_{cn,2}(s) = C_0^{(2)}. \quad (7)$$

З врахування зробленого допущення, будемо мати

$$W_{cn,2}^{ED}(s) = k_{ED} C_0^{(2)}. \quad (8)$$

Для даних, які наведені в роботі [13], та за допомогою програмного забезпечення, розробленого в середовищі MatLab, отримані числові значення параметрів передавальних функцій $W_{13}(s)$ і $W_{23}(s)$ (табл. 1). Відмітимо, що структура передавальних функцій $W_{13}(s)$ і $W_{23}(s)$ є такою:

$$W(s) = \frac{\sum_{j=0}^m b_j^{m-j}}{\sum_{i=0}^n a_i^{n-i}}.$$

Таблиця 1

Числові значення параметрів передавальних функцій $W_{13}(s)$ і $W_{23}(s)$

$W_{13}(s)$	b_j	$4.152 \cdot 10^4$	²⁸⁶⁸	38.68	1.0	0.07748	-	-	-	-
	a_i	$1.08 \cdot 10^{13}$	$3.574 \cdot 10^{13}$	$5.528 \cdot 10^{12}$	$3.117 \cdot 10^{11}$	$7.863 \cdot 10^9$	$9.646 \cdot 10^7$	$5.592 \cdot 10^5$	¹³⁰³	
$W_{23}(s)$	b_j	$6.949 \cdot 10^{13}$	$1.114 \cdot 10^{13}$	$6.383 \cdot 10^{11}$	$1.633 \cdot 10^{10}$	$2.031 \cdot 10^8$	$1.193 \cdot 10^6$	²⁸¹⁸	^{2.20} ₂	-
	a_i	$1.08 \cdot 10^{13}$	$3.574 \cdot 10^{13}$	$5.528 \cdot 10^{12}$	$3.117 \cdot 10^{11}$	$7.863 \cdot 10^9$	$9.646 \cdot 10^7$	$5.592 \cdot 10^5$	¹³⁰³	¹ ₀

Динамічні властивості об'єктів, які описуються лінійними або лінеаризованими математичними моделями, можна характеризувати у просторі станів або частотними характеристиками.

Відомо, що частотні характеристики дають уявлення про розподіл енергії за частотами. Розподіл енергії за станами можна обчислити, якщо скористатись сингулярними числами Генкеля [17,18].

Метод, в основі якого покладені сингулярні числа Генкеля, дає змогу побудувати діаграму, яка покаже розподіл енергії за станами. Кількість домінуючих станів на діаграмі визначають порядок редукованої моделі.

На рис. 3 зображена діаграма сингулярних чисел Генкеля, яка показує, що кількість домінуючих станів дорівнює трьом.

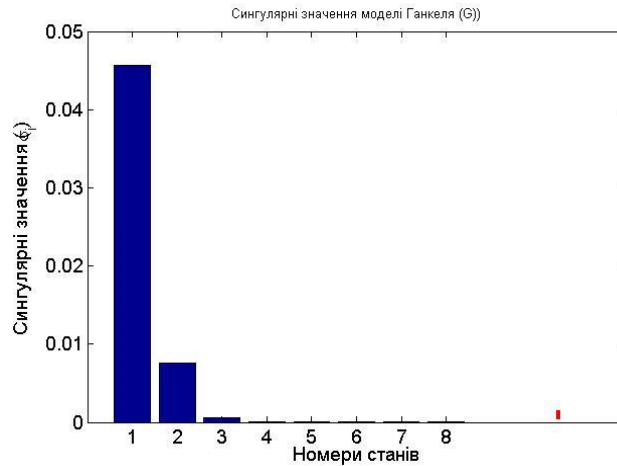


Рис. 3. Діаграма Ганкеля (передавальна функція $W_{13}(s)$)

Результати редукції передавальної функції $W_{13}(s)$ зображені на рис.4.

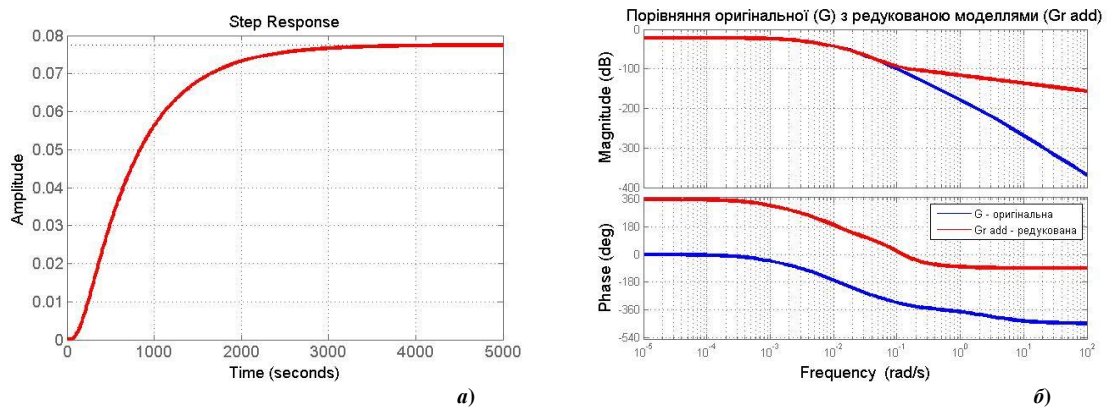


Рис. 4. «Оригінальна» і редукована перехідна характеристика (а) і логарифмічні частотні характеристики (б)

Аналіз отриманих результатів показує, що похибка апроксимації за перехідною характеристикою (рис. 4, а) є незначною і становить $2.85 \cdot 10^{-2} \%$. Похибку апроксимації обчислювали за такою формулою:

$$\delta_r = \max_i \left\{ \frac{|h(t_i) - h^{(r)}(t_i)|}{\max_i |h(t_i)|} \right\} \cdot 100\%, \quad i = \overline{1, N_r}, \quad (9)$$

де $h(t_i)$, $h^{(r)}(t_i)$ - «оригінальна» і редукована перехідні характеристики нагрівача за каналом $u - \theta_n^{out}$; N_r - ординати перехідних характеристик, обчислених у дискретному часі.

Редукована логарифмічна амплітудно-частотна характеристика співпадає з відповідною «оригінальною» характеристикою в діапазоні низьких частот ($\omega \leq 0,1c^{-1}$). Логарифмічна фазо-частотна характеристика (ЛФЧХ) має майже постійний зсув фази, що не перевершує 2π у всьому діапазоні частот.

Для аналізу причини такого значного розходження між «оригінальною» і редукованими ЛФЧХ знайдемо нулі «оригінальної» і редукованої передавальних функцій $W_{13}(s)$ і $W_{13}^r(s)$.

Для передавальної функції $W_{13}(s)$ маємо: $ni_1 = -5.1784 \cdot 10^{-2}$, $ni_2 = -1.4873 \cdot 10^{-2}$, $ni_3 = -2.4232 \cdot 10^{-3}$;

Відповідно нулі редукованої передавальної функції $W_{13}^r(s)$ є такими: $ni_1^r = 7.0869 \cdot 10^{-2} + j8.1719 \cdot 10^{-2}$, $ni_1^r = 7.0869 \cdot 10^{-2} - j8.1719 \cdot 10^{-2}$. Наявність прямих нулів

передавальній функції $W_{13}^r(s)$ свідчить про те, що в процесі редукції відбулася трансформація передавальній функції $W_{13}(s)$ з мінімально-фазової в немінімально-фазову $W_{13}^a(s)$. Такий перехід є причиною значної різниці між їхніми ЛФЧХ.

Як альтернатива методу Генкеля нами розроблений метод пониження порядку передавальній функції, в основі якого лежить метод площ [19].

Ординати перехідної характеристики $h(t_i)$, $i = \overline{1, N_r}$ будемо вважати «експериментальними» даними, які апроксимуємо функцією $h_a(t_i)$, що дасть змогу визначити редуковану $W_{13}^a(s)$.

За допомогою програмного забезпечення, розробленого в середовищі MatLab, отримана така передавальна функція:

$$W_{13}^a(s) = \frac{k_a}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} \quad (10)$$

Результати редукції передавальній функції $W_{13}(s)$ відтворює рис. 5.

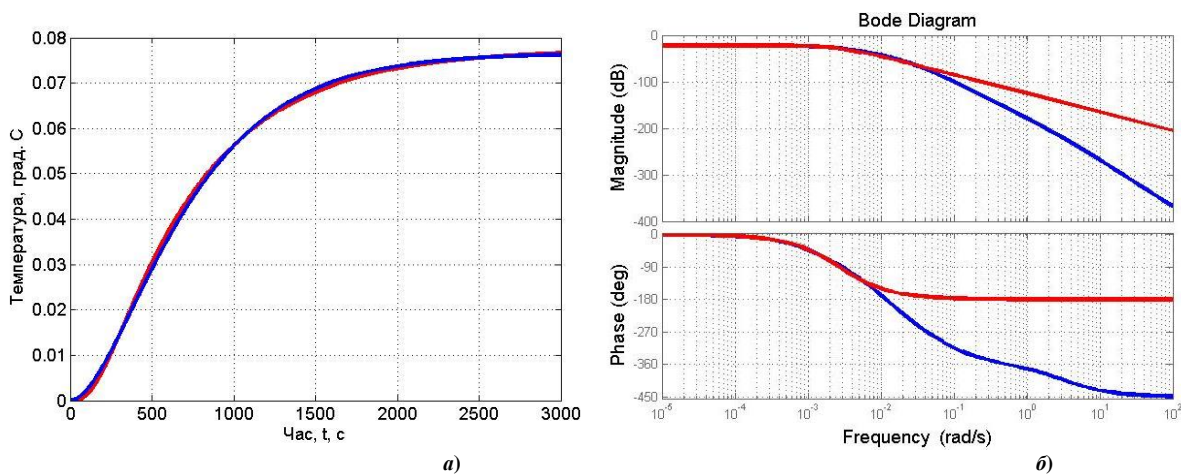


Рис. 5. «Оригінальна» і редукована перехідна характеристика (а) і логарифмічні частотні характеристики (б) (метод площ)

Похибка редукції обчислена за формулою (9) і є такою: $\delta_r = 8.91 \cdot 10^{-2} \%$.

Параметри редукованої передавальній функції $W_{13}^a(s)$ вміщує табл. 2.

Таблиця 2

Параметри передавальній функції $W_{13}^a(s)$

$W_{13}^a(s)$	k_a	0.0766	-	-
	a_i	141180.23	771.84	1.0

Аналіз отриманих результатів показує, що похибка редукції (рис. 5, а) за методом площ у порівнянні з методом Генкеля є незначно більшою, а за логарифмічними частотними характеристиками (ЛЧХ) отримані результати є значно кращими (рис. 5, б). Для діапазону частот $\omega \leq 0,02 \text{ c}^{-1}$ маємо значне співпадіння ЛЧХ. Оскільки нагрівник за каналом передачі $u - \theta_{in}^{out}$ характеризується значною інерційністю, то частоти більші за $0,02 \text{ c}^{-1}$ будуть подавлятися об'єктом.

Редукцію передавальній функції $W_{23}(s)$ (табл.1) виконали за методом Генкеля. На рис. 6 і 7 зображені результати редукції, які отримані за допомогою програмного забезпечення, розробленого в середовищі MatLab.

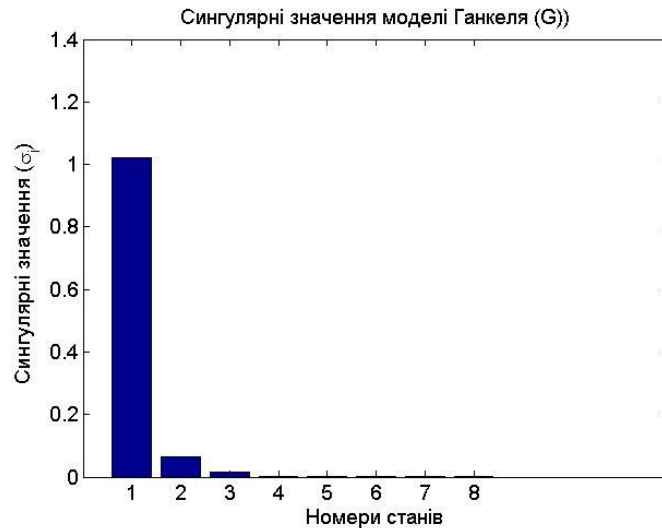


Рис. 6. Сингулярні числа станів передавальної функції $W_{23}(s)$ за каналом $u - \theta_{dg}$

Як показує рис. 6 є два домінуючі стани передавальної функції $W_{23}(s)$. При виборі $n_{23} = 2$ отримали редуковану передавальну функцію $W_{23}^r(s)$. На рис. 7 зображені перехідна характеристика і логарифмічні частотні характеристики «оригінальної» $W_{23}(s)$ і редукованої $W_{23}^r(s)$ передавальних функцій.

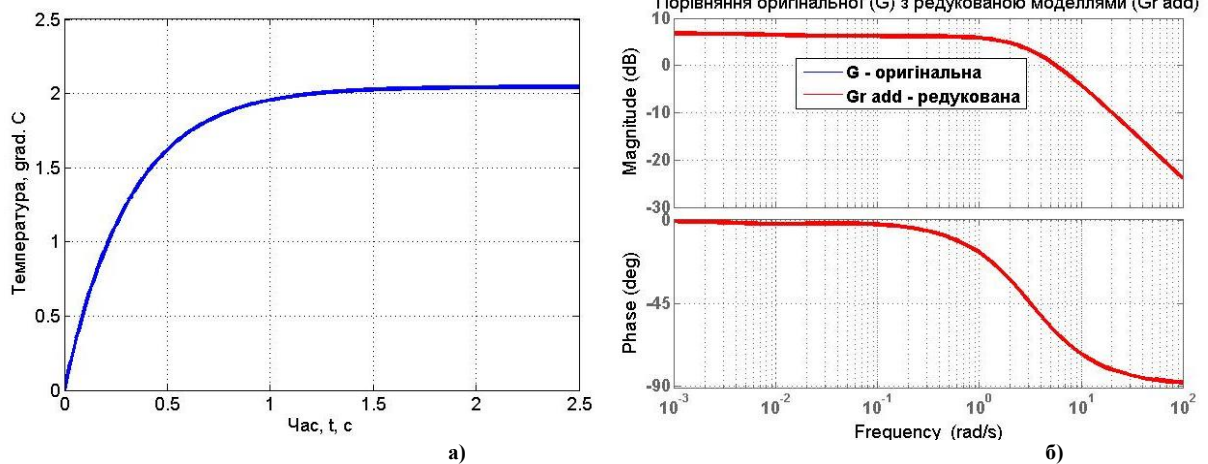


Рис. 7. «Оригінальна» і редукована перехідна характеристика (а) і логарифмічні частотні характеристики (б) (канал $u - \theta_{dg}$)

Аналіз рис. 7 дозволяє зробити висновок, що редукція передавальної функції $W_{23}(s)$ успішно виконана. Похибка редукції за перехідною характеристикою (рис. 7, а), обчислена за формулою (9), має таке значення: $\delta_r = 3.53 \cdot 10^{-2} \%$. У діапазоні частот $\omega \in [10^2; 10^{-3}]$ спостерігається повний збіг логарифмічних частотних характеристик «оригінальної» і редукованої передавальних функцій (рис. 7, б).

Параметри редукованої передавальної функції $W_{23}^r(s)$ занесені в табл. 3.

Таблиця 3

Параметри передавальної функції $W_{23}^r(s)$

$W_{23}^r(s)$	b_j	231.6	2.172	-
	a_i	35.99	113.7	1.0

У відповідності до табл. 3 редукована передавальна функція $W_{23}^r(s)$ набуде такого значення:

$$W_{23}^r(s) = \frac{b_0s + b_1}{\alpha_0s^2 + \alpha_1s + \alpha_2}. \quad (11)$$

Отже, після редукції передавальних функцій $W_{13}(s)$ і $W_{23}(s)$ та зроблених допущень щодо виконавчого пристрою і регулятора Con_2 (рис. 1), значення порядків чисельника і знаменника функції $W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s)$ будуть такими ($n_{13} = 2$, $n_{23} = 2$): $\deg(R_w) = 6$, $\deg(Q_w) = 6$.

Після підстановки формул (1), (9) – (11) у вираз (4) та виконання необхідних арифметичних операцій, отримаємо

$$W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s) = \frac{(\mu_0s^5 + \mu_1s^4 + \mu_2s^3 + \mu_3s^2 + \mu_4s + \mu_5)s}{\pi_0s^6 + \pi_1s^5 + \pi_2s^4 + \pi_3s^3 + \pi_4s^2 + \pi_5s + \pi_6}, \quad (12)$$

де

$$\mu_0 = a_0\alpha_0T_{sr};$$

$$\mu_1 = a_0\alpha_0 + (a_0\alpha_1 + a_1\alpha_0)T_{sr};$$

$$\mu_2 = a_0\alpha_1 + a_1\alpha_0 + (a_0\alpha_2 + a_1\alpha_1 + a_2\alpha_0)T_{sr} + a_0b_0k_{ED}^{sr}C_0^{(2)};$$

$$\mu_3 = a_0\alpha_2 + a_1\alpha_1 + a_2\alpha_0 + (a_2\alpha_1 + \alpha_2)T_{sr} + (a_0b_1 + a_1b_0)k_{ED}^{sr}C_0^{(2)};$$

$$\mu_4 = a_1\alpha_2 + a_2\alpha_1 + a_2\alpha_2T_{sr} + (a_1b_1 + a_2b_0)k_{ED}^{sr}C_0^{(2)};$$

$$\mu_5 = a_2\alpha_2 + a_2b_1k_{ED}^{sr}C_0^{(2)}.$$

$$\pi_0 = a_0\alpha_0T_{sr};$$

$$\pi_1 = a_0\alpha_0 + (a_0\alpha_1 + a_1\alpha_0)T_{sr};$$

$$\pi_2 = (T_{sr}\alpha_2 + \alpha_1)a_0 + (\alpha_1T_{sr} + \alpha_0)a_1 + a_2\alpha_0T_{sr} + a_0b_0k_{ED}^{sr}C_0^{(2)} + \alpha_0k_sT_{sr}C_0^{(1)}C_0^{(2)};$$

$$\pi_3 = a_0\alpha_2 + (T_{sr}\alpha_2 + \alpha_1)a_1 + (\alpha_1T_{sr} + \alpha_0)a_2 + (a_1b_0 + a_0b_1)k_{ED}^{sr}C_0^{(2)} + ((\alpha_1T_{sr} + \alpha_0)C_0^{(1)} + \alpha_0T_{sr}C_1^{(1)})k_sC_0^{(2)};$$

$$\pi_4 = \alpha_2a_1 + (T_{sr}\alpha_2 + \alpha_1)a_2 + (a_2b_0 + a_1b_1)k_{ED}^{sr}C_0^{(2)} + \alpha_1T_{sr} + (\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2T_{sr})k_sC_0^{(1)}C_0^{(2)};$$

$$\pi_5 = \alpha_2a_2 + a_2b_1k_{ED}^{sr}C_0^{(2)} + ((\alpha_2T_{sr} + \alpha_1)C_1^{(1)} + \alpha_2C_0^{(1)})k_sC_0^{(2)};$$

$$\pi_6 = \alpha_2C_1^{(1)}k_sC_0^{(2)};$$

$$k_{ED}^{sr} = k_{sr}k_{ED}; k_s = k_a k_{s,1} k_{ED}.$$

Знайдемо статичну похибку керування відносно завдання регулятора Con_1

$$\varepsilon_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_1(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE_1(s),$$

де $E_1(s)$ - зображення за Лапласом похибки керування $\varepsilon_1(t)$ при стрибкоподібній вхідній дії

$$\theta_{ir}(t) = 1(t).$$

Враховуючи, зображення за Лапласом одиничної функції, будемо мати

$$\varepsilon_\infty = \lim_{s \rightarrow 0} W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s). \text{ Якщо прийняти до уваги значення } W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s), \text{ яке задано формулою (12), то}$$

$\varepsilon_\infty = 0$, тобто система з III- та з II-регуляторами, які включені відповідно в основний і допоміжний контури керування (рис. 2), у статичному режимі забезпечує нульову похибку керування.

Параметри налаштування III- та II- регуляторів визначимо шляхом мінімізації узагальненого квадратичного критерію (3), який розіб'ємо на дві частини

$$J_1 = \int_0^{\infty} \varepsilon_1(t) dt, \quad (13)$$

$$J_2 = \tau^2 \int_0^{\infty} \dot{\varepsilon}_1^2(t) dt. \quad (14)$$

Обчислення інтегралів (13) і (14) можливе [20], якщо відомі зображення за Лапласом підінтегральних функцій, у яких різниці порядків поліномів знаменника і чисельника дорівнюють одиниці.

Знаходимо зображення за Лапласом вихідної величини $\varepsilon_1(t)$ за умови, що на вході діє одиничне стрибкоподібне збурення. Тоді

$$E_1(s) = \frac{\mu_0 s^5 + \mu_1 s^4 + \mu_2 s^3 + \mu_3 s^2 + \mu_4 s + \mu_5}{\pi_0 s^6 + \pi_1 s^5 + \pi_2 s^4 + \pi_3 s^3 + \pi_4 s^2 + \pi_5 s + \pi_6}. \quad (15)$$

Тепер знайдемо

$$L[\dot{\varepsilon}_1(t)] = sE_1(s) - \varepsilon_1(0).$$

За теоремою про кінцеве значення оригіналу за його зображенням будемо мати

$$\varepsilon_1(0) = \lim_{s \rightarrow \infty} sE_1(s).$$

Оскільки $E_1(s)$ задано формулою (15), то

$$\varepsilon_1(0) = \frac{\mu_0}{\pi_0}.$$

З врахуванням знайденого значення $\varepsilon_1(0)$ та формули (15), маємо:

$$L[\dot{\varepsilon}_1(t)] = \frac{\mu_0 s^5 + \mu_1 s^4 + \mu_2 s^3 + \mu_3 s^2 + \mu_4 s + \mu_5}{\pi_0 s^6 + \pi_1 s^5 + \pi_2 s^4 + \pi_3 s^3 + \pi_4 s^2 + \pi_5 s + \pi_6} - \frac{\mu_0}{\pi_0}. \quad (16)$$

Так як $\mu_0 = \alpha_0 a_0 T_{sr}$ і $\pi_0 = a_0 \alpha_0 T_{sr}$, то $\mu_0 = \pi_0$ і співвідношення (16) набуде такого вигляду:

$$L[\dot{\varepsilon}_1(t)] = \frac{\pi_0 s^6 + \mu_1 s^5 + \mu_2 s^4 + \mu_3 s^3 + \mu_4 s^2 + \mu_5 s}{\pi_0 s^6 + \pi_1 s^5 + \pi_2 s^4 + \pi_3 s^3 + \pi_4 s^2 + \pi_5 s + \pi_6} - 1.$$

Введемо такі позначення: $\eta_i = \mu_{i+1} - \pi_{i+1}$, $i = \overline{0, 4}$. Тоді

$$L[\dot{\varepsilon}_1(t)] = \frac{\eta_0 s^5 + \eta_1 s^4 + \eta_2 s^3 + \eta_3 s^2 + \eta_4 s + \eta_5}{\pi_0 s^6 + \pi_1 s^5 + \pi_2 s^4 + \pi_3 s^3 + \pi_4 s^2 + \pi_5 s + \pi_6}, \quad (17)$$

де $\eta_5 = -\pi_6$.

Порівнюючи формули (16) і (17), бачимо, що різниці поліномів чисельника і знаменника як в (16), так і в (17) дорівнюють одиниці; крім того вирази (16) і (17) мають тотожні знаменники. Тому узагальнений квадратичний критерій подамо у такій формі:

$$J = \frac{1}{J_D} (J_{N,1} + \tau^2 J_{N,2}). \quad (18)$$

Для обчислень J_D , $J_{N,1}$ і $J_{N,2}$ скористаємося формулами, які наведені в [21]. Для $n = 6$ знаходимо:

$$\begin{aligned} J_{N,1} &= \mu_0^2 m_0 + (\mu_1^2 - 2\mu_0 \mu_2) m_1 + (\mu_2^2 - 2\mu_1 \mu_3 + 2\mu_0 \mu_4) m_2 + \\ &+ (\mu_3^2 - 2\mu_2 \mu_4 + 2\mu_1 \mu_5) m_3 + (\mu_4^2 - \mu_3 \mu_5) m_4 + \mu_5^2 m_5, \\ J_{N,2} &= \eta_0^2 m_0 + (\eta_1^2 - 2\eta_0 \eta_2) m_1 + (\eta_2^2 - 2\eta_1 \eta_3 + 2\eta_0 \eta_4) m_2 + \end{aligned}$$

$$+(\eta_3^2 - 2\eta_2\eta_4 + 2\eta_1\eta_5)m_3 + (\eta_4^2 - \eta_3\eta_5)m_4 + \eta_5^2m_5,$$

$$J_D = 2\pi_6(\pi_5m_5 - \pi_3m_4 + \pi_1m_3),$$

$$\text{де } m_0 = \frac{1}{\pi_0}(\pi_2m_1 - \pi_4m_2 + \pi_6m_3);$$

$$m_1 = -\pi_6\pi_5\pi_1 + \pi_6\pi_3^2 + \pi_5^2\pi_2 - \pi_5\pi_4\pi_3;$$

$$m_2 = \pi_6\pi_3\pi_1 + \pi_5^2\pi_0 - \pi_5\pi_4\pi_1;$$

$$m_3 = \pi_6\pi_1^2 + \pi_5\pi_3\pi_0 - \pi_5\pi_2\pi_1;$$

$$m_4 = \frac{1}{\pi_6}(\pi_4m_3 - \pi_2m_2 + \pi_0m_1);$$

$$m_5 = \frac{1}{\pi_6}(\pi_5m_5 - \pi_3m_4 + \pi_1m_3);$$

Узагальнений критерій (18) при відомих параметрах системи є функцією величин $C_0^{(1)}$, $C_1^{(1)}$ і $C_0^{(2)}$.

Невідомі параметри налаштування $C_0^{(1)}$, $C_1^{(1)}$ і $C_0^{(2)}$ регуляторів Con_1 і Con_2 (рис.1) знаходять із умови мінімізації критерію (18) та за умови стійкості системи і виконання співвідношень $C_0^{(1)} > 0$, $C_1^{(1)} > 0$ і $C_0^{(2)} > 0$.

Умови стійкості системи визначимо за критерієм Гурвіца-Рауса, тобто

$$\pi_1\pi_2 - \pi_0\pi_3 > 0;$$

$$\pi_1\pi_2\pi_3 - \pi_1^2\pi_4 + \pi_0\pi_1\pi_5 - \pi_0\pi_3^2 > 0;$$

$$\pi_1\pi_2\pi_3\pi_4 - \pi_0^2\pi_5^2 - \pi_0\pi_1\pi_3\pi_6 + 2\pi_0\pi_1\pi_4\pi_5 + \pi_0\pi_2\pi_3\pi_5 - \pi_0\pi_3^2\pi_4 + \pi_1^2\pi_2\pi_6 - \pi_1^2\pi_4^2 - \pi_1\pi_2^2\pi_5 > 0;$$

$$\pi_1\pi_2\pi_3\pi_4\pi_5 - \pi_0^2\pi_5^3 - 3\pi_0\pi_1\pi_3\pi_5\pi_6 + 2\pi_0\pi_1\pi_4\pi_5^2 + \pi_0\pi_2\pi_3\pi_5^2 + \pi_0\pi_3^2\pi_6 - \pi_0\pi_3^2\pi_4\pi_5 - \pi_1^3\pi_6^2 + 2\pi_1^2\pi_2\pi_5\pi_6 + \pi_1^2\pi_3\pi_4\pi_6 - \pi_1^2\pi_4^2\pi_5 - \pi_1\pi_2^2\pi_5^2 - \pi_1\pi_2\pi_3^2\pi_6 > 0.$$

Таким чином, задача обчислення параметрів налаштування ПІ- та ПІ-регуляторів каскадно-зв'язаної системи за узагальненим квадратичним критерієм (18) є задачею нелінійного програмування.

Для оцінки якості процесу керування необхідно визначити передавальну функцію за каналом «завдання регулятору Con_1 - температура продукту на виході». Оскільки для лінійних (лінеаризованих) систем має місце принцип суперпозиції, то прирівнявши до нуля фактори збурення θ_n^{in} і g_n , отримаємо структурну схему системи (рис. 8).

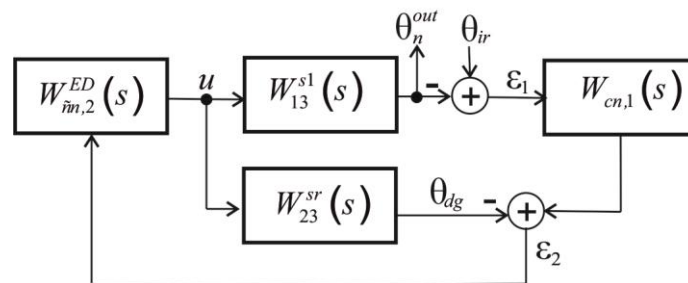


Рис. 8. Структурна схема системи по каналу $\theta_{ir} - \theta_n^{out}$

Після перенесення вузла «завдання» (рис. 8) через передавальну функцію $W_{cn,1}(s)$ за ходом сигналу отримуємо структуру, яка зображена на рис. 9.

На основі структурної схеми, зображеної на рис. 9, отримана передавальна функція каскадно-зв'язаної системи по каналу $\theta_{ir} - \theta_n^{out}$ у такому вигляді:

$$W_{\theta_n^{out}\theta_{ir}}(s) = \frac{W_{cn,1}(s)W_{cn,2}^{ED}(s)W_{13}^{s,1}(s)}{1 + W_{cn,2}^{ED}(s)(W_{23}^{sr}(s) + W_{13}^{s,1}(s)W_{cn,1}(s))}, \quad (19)$$

де $W_{13}^{s,1}(s) = W_{13}^a(s)W_{s,1}(s)$; $W_{s,1}(s) = k_{s,1}$ - передавальна функція давача S_1 ; $W_{23}^{sr}(s) = W_{23}^r(s)W_{sr}(s)$

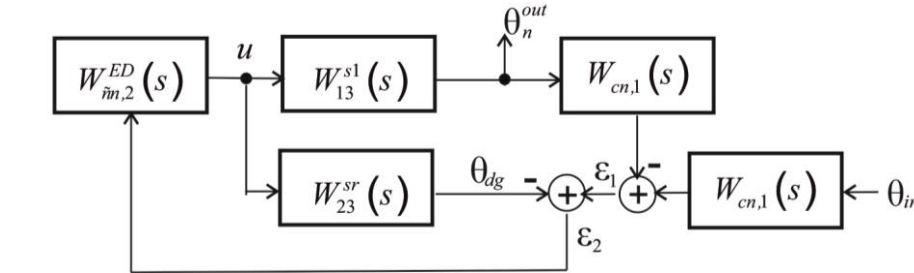


Рис. 9. Структурна схема системи після перетворення

Аналіз передавальних функцій (4) і (19) показує, що вони мають тотожні знаменники і відрізняються тільки чисельниками.

Раніше зроблено допущення, що давач S_1 - без інерційний, а динамічні властивості давача S_2 (термопара разом з нормуючим перетворювачем напруги) будемо описувати аперіодичною ланкою першого порядку

$$W_{sr}(s) = \frac{k_{sr}}{T_{sr}s + 1}. \quad (20)$$

Після підстановки відповідних передавальних функцій, які визначені виразами (8), (10), (11) і (20), у формулу (19), отримали

$$W_{\theta_n^{out}\theta_{ir}} = \frac{q_0s^4 + q_1s^3 + q_2s^2 + q_3s + q_4}{\pi_0s^6 + \pi_1s^5 + \pi_2s^4 + \pi_3s^3 + \pi_4s^2 + \pi_5s + \pi_6}, \quad (21)$$

де $q_0 = \alpha_0 k_s T_{sr} C_0^{(1)} C_0^{(2)}$;

$q_1 = (\alpha_0 C_0^{(1)} + (\alpha_0 C_1^{(1)} + \alpha_1 C_0^{(1)}) T_{sr}) k_s C_0^{(2)}$;

$q_2 = (\alpha_0 C_1^{(1)} + \alpha_1 C_0^{(1)} + (\alpha_1 C_1^{(1)} + \alpha_2 C_0^{(1)}) T_{sr}) k_s C_0^{(2)}$;

$q_3 = (C_1^{(1)} \alpha_1 + \alpha_2 (C_0^{(1)} + C_1^{(1)} T_{sr})) k_s C_0^{(2)}$;

$q_4 = \alpha_2 k_s C_0^{(2)} C_1^{(1)}$.

Температура продукту (нафти) T_n^{out} на виході нагрівача будемо вимірювати за допомогою термометру опору з діапазоном вимірювання 0...150 °С, а для вимірювання температури димових газів застосуємо термопару типу ТХА з діапазоном вимірювання 0...900 °С. Термометр опору і термопара під'єднуються до нормуючого перетворювача з напругою на виході 0...10 В.

Введемо такі позначення: N_n^{out} і N_{dg} - верхні межі діапазонів вимірювань температур нафти і димових газів; N_p - верхнє значення напруги на виході нормуючого перетворювача. Тоді $k_{s,1} = \frac{N_n^{out}}{N_p}$ і

$$k_{sr} = \frac{N_{dg}}{N_p}.$$

Для виконавчого механізму з позиціонером, який має рівномірну статичну характеристику, k_{ED} визначимо як відношення максимальної витрати паливного газу до діапазону зміни сигналу на вході позиціонера (0...100 %). Оскільки максимальна витрата паливного газу $B_{\max} = 58 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$, то

$$k_{ED} = \frac{0,016}{1} = 0,016 \text{ кг/с.}$$

Передавальну функцію давача температури в [15] рекомендовано вибрати у вигляді аперіодичної ланки другого порядку з такими параметрами: $T_1 = 30 \text{ с}$ і $T_2 = 5 \text{ с}$. Вибір давача S_2 з такими динамічними властивостями збільшує порядок передавальної функції (12) на одиницю, що привносить додаткові труднощі в обчисленні узагальненого квадратичного критерію. Тому передавальну функцію давача S_2 з використанням методу площ апроксимовано аперіодичною ланкою першого порядку. Результат такої апроксимації відтворює рис. 9. У результаті апроксимації отримали $T_{sr} = 33,8 \text{ с}$.

З використанням даних, які наведені в табл. 2 і 3, а також з врахуванням значень параметрів передавальних функцій виконавчого пристрою ED та давачів S_1 і S_2 була формалізована задача визначення параметрів налаштування регуляторів Con_1 і Con_2 (рис. 1) за критерієм (3) з врахуванням обмежень, що впливають із вимоги забезпечення стійкості системи.

У задачах умовної мінімізації частина обмежень є активна, а інша частина – пасивні обмеження. Розв'язок задачі на умовний мінімум, якщо він існує, знаходиться на множині активних обмежень.

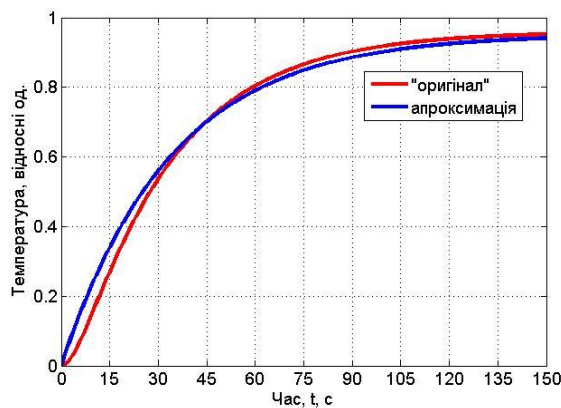


Рис. 9. Результат апроксимації динаміки давача S_2 аперіодичною ланкою першого порядку

Особливістю сформульованої задачі – пошук параметрів налаштування ПІ- і П-регуляторів за узагальненим квадратичним критерієм – є те, що мінімум критерію (18) необхідно шукати при виконанні обмежень, які впливають із умови стійкості системи. Такі умови мають вигляд строгих нерівностей, крім того параметри налаштування регуляторів $C_0^{(1)}$, $C_1^{(1)}$ і $C_0^{(2)}$ за фізичною сутністю повинні бути додатними величинами.

Таким чином, оптимальний розв'язок сформульованої задачі повинен бути внутрішньою точкою допустимої області.

У середовищі MatLab для розв'язування задачі умовної мінімізації використовується вбудована функція `fmincon`, яка реалізує градієнтний метод пошуку локального мінімуму [22].

Числові експерименти з розв'язання задачі (18) з відповідними обмеженнями показали, що такий розв'язок чутливий до початкових умов. При зміні початкових умов отримуємо різний характер перехідного процесу каскадно-зв'язаної системи, за каналом $\theta_{ir} - \theta_n^{out}$. Такий результат свідчить про те, що функція (18) є багатю екстремальною.

Для пошуку глобального мінімуму був використаний генетичний алгоритм [23], який на першому етапі розв'язування оптимізаційної задачі знаходив стартову точку \bar{x}_0 для алгоритму деформованого симплексу (метод Нелдера-Міда) [24].

У результаті реалізації розробленого програмного забезпечення отримані такі параметри налаштування ПІ- і ПІ-регуляторів:

ПАРАМЕТРИ НАЛАШТУВАННЯ РЕГУЛЯТОРІВ

Основний контур (ПІ-регулятор)

$C_0=7.6800e+04$

$C_1=6.9780e+00$

Допоміжний контур (ПІ-регулятор)

$C_0=4.1242e+02$

Графік перехідного процесу при вхідній величині $\theta_{ir} = 50 \cdot 1(t)$ зображений на рис. 10, за допомогою якого знайдені показники якості процесу керування

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ

Перерегулювання

$\sigma=2.3999e+01\%$

Час регулювання

$t_c=1.8790e+02$ с

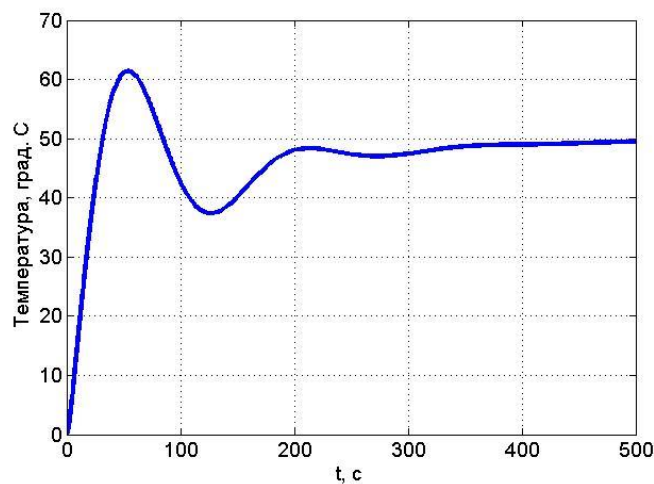


Рис. 10. Графік перехідного процесу за каналом $\theta_{ir} - \theta_n^{out}$

Таким чином, мінімізація узагальненого квадратичного критерію дала змогу визначити параметри налаштування $C_0^{(1)}$, $C_1^{(1)}$ і $C_0^{(2)}$ ПІ- та ПІ-регуляторів та оцінити якість перехідного процесу за каналом $\theta_{ir} - \theta_n^{out}$.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

1. Доведено, що шляховий нагрівник нафти як об'єкт автоматичного керування за основним каналом керування «витрата паливного газу – температура на виході» має значну інерційність. Для покращення показників якості процесу керування запропоновано використати додатковий інформаційний параметр – температуру димових газів і на цій основі синтезувати каскадно-зв'язану систему керування.

2. Проведені дослідження і комп'ютерне моделювання показали, що в основному контурі керування доцільно використати ПІ-регулятор, а в допоміжному ПІ-регулятор. Запропонований для розрахунку параметрів налаштування регуляторів узагальнений квадратичний критерій виявився непридатним для практичного використання через високий порядок передавальної функції похибки неузгодженості.

3. Для зменшення порядку передавальної функції похибки неузгодженості використані методи редукції (метод Генкеля і метод площ), що дало змогу знизити порядок передавальної функції з 19 до 6.

4. За допомогою алгоритмічного і програмного забезпечення задачі, розробленого в середовищі MatLab, отримані параметри налаштування ПІ- та ПІ-регуляторів та визначені показники якості процесу керування: перерегулювання (23,9 %) і час регулювання (187,9 с).

Література

1. Rahmati A. R., Reiszadeh M. An experimental study on the effects of the use of multi-walled carbon nanotubes in ethylene glycol/water-based fluid with indirect heaters in gas pressure reducing stations. *Applied Thermal Engineering*. Volume 134. 2018, P. 107-117.
2. Rashidmardani Ali, Hamzei Mahdi Effect of Various Parameters on Indirect Fired Water Bath Heaters' Efficiency to Reduce Energy Losses. *International Journal of Science and Engineering Investigations*. vol. 2, issue 12, 2013. P. 17 – 24.
3. Seyed Alireza Mostafavi, Mohammad Shirazi. Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption. *Energy*. 2020. Vol. 212.
4. Amin Amiri Delouei, Hooman Naeimi Hassan Sajjadi Meysam Atashafrooz Meysam Imanparast Chamkha, Ali J. An active approach to heat transfer enhancement in indirect heaters of city gate stations: An experimental modeling. *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 237.
5. Рябова І. Б., Сайчук І. В., Шаршанов А. Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі: навч. посібник. Харків: АПБУ, 2002. 355 с.
6. Rahmati A. R., Reiszadeh M. An experimental study on the effects of the use of multi-walled carbon nanotubes in ethylene glycol/water-based fluid with indirect heaters in gas pressure reducing stations. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol.134. P. 107-117
7. Rashidmardani Ali, Hamzei Mahdi. Effect of Various Parameters on Indirect Fired Water Bath Heaters' Efficiency to Reduce Energy Losses. *Science and Engineering Investigations*. 2013. vol. 2, issue 12. P. 17 – 24.
8. Mostafavi Seyed Alireza, Shirazi Mohammad. Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption. *Energy*. 2020. Vol. 212. P. 2 -18.
9. Khanmohammadi Shoaib, Shahsavari Amin. Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study). *Energy Equipment and Systems*. 2020. Vol. 8. No 4. P. 349 – 365.
10. Amir Ebrahimi-Moghadam, Mahdi Deymi-Dashtebayaz, Hosein Jafari Amir Niazmand. Energetic, exergetic, environmental and economic assessment of a novel control system for indirect heaters in natural gas city gate stations. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 141. P. 2573 – 2588.
- 11-1. Горбійчук М. І., Василенчук М. З. Синтез структурної схеми нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування *ВІСНИК ХНТУ. Інженерні науки* № 4(87), 2023. С. 44 – 52.
- 12-2. Горбійчук М. І., Василенчук М. З., Когутяк М. І. Синтез лінеаризованих математичних моделей нагрівника з проміжним теплоносієм. *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*, 2023, вип. 3. С. 144 – 153.
13. Горбійчук М. І., Василенчук М. З., Когутяк М. І. Аналітичні дослідження динамічних властивостей прямих нагрівачів нафти.
14. Newton, George C., Kaiser, James F. *Analytical Design of Linear Feedback Controls* New York: J. Wiley and Sons; London: Chapman and Hall, 1957. 419 p.
15. Yanfeng Li, Zhijie Zhang, Xiaojian Hao, Wuliang Yin. A Measurement System for Time Constant of Thermocouple Sensor Based on High Temperature Furnace. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/12/2585>
16. Чарін В.С. *Лінійна алгебра*. К.: Техніка, 2005. – 413 с.
17. Stephen Boyd, Laurent El Ghaoui, Eric Feron, and Venkatasubramanian Balakrishnan. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Philadelphia: Siam, 1994. 205 p.
18. Kuster George E. H-infinity Norm Calculation via a State Space Formulation. URL: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/49544/Kuster_GE_T_2013.pdf?isAllowed=y&sequence=1
19. Horbiychuk M. I., Lazoriv N. T., Kohutyk M. I., Manuliak I. Z. Experimental research on muffle furnace dynamic properties. *NAUKOVYI VISNYK Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. №3 (195). 2023. С. 144-150.
20. Попович М. Г., Ковальчук О. В. *Теорія автоматичного керування: підручник*. 2-ге вид., перероб. і доп. К.: Либідь, 2007. 656 с.
21. Newton G. C., Gould L.A., Kaiser J. R. *Analytical design of linear feedback controls*. New York. John Wiley & Sons, Inc., London. Chapman & Hall, LTD. URL.:
22. Лазарев Ю. Ф. *Довідник з MatLab*. К.: НТУУ «КПІ», 2013. 132 с.
23. Горбійчук М. І., Гарасимів В. М. *Теорія алгоритмів, числові методи та програмні засоби моделювання: навчальний посібник*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. 313 с.
24. Горбійчук М. І. *Алгоритми і методи обчислень: навч. посібник*. Івано-Франківськ: Факел, 2014. 309 с.

References

1. Rahmati A. R., Reiszadeh M. An experimental study on the effects of the use of multi-walled carbon nanotubes in ethylene glycol/water-based fluid with indirect heaters in gas pressure reducing stations. *Applied Thermal Engineering*. Volume 134. 2018, P. 107-117.

2. Rashidmardani Ali, Hamzei Mahdi Effect of Various Parameters on Indirect Fired Water Bath Heaters Efficiency to Reduce Energy Losses. International Journal of Science and Engineering Investigations. vol. 2, issue 12, 2013. R. 17 – 24.
3. Seyed Alireza Mostafavi, Mohammad Shirazi. Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption. Energy. 2020. Vol. 212.
4. Amin Amiri Delouei, Hooman Naeimi Hassan Sajjadi Meysam Atashafrooz Meysam Imanparast Chamkha, Ali J. An active approach to heat transfer enhancement in indirect heaters of city gate stations: An experimental modeling. Applied Thermal Engineering. 2024. Vol. 237.
5. Riabova I. B., Saichuk I. V., Sharshanov A. Ya. Termodinamika i teploperedacha u pozhamii spravi: navch. posibnyk. Kharkiv: APBU, 2002. 355 s.
6. Rahmati A. R., Reiszadeh M. An experimental study on the effects of the use of multi-walled carbon nanotubes in ethylene glycol/water-based fluid with indirect heaters in gas pressure reducing stations. Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 134. P. 107-117
7. Rashidmardani Ali, Hamzei Mahdi. Effect of Various Parameters on Indirect Fired Water Bath Heaters Efficiency to Reduce Energy Losses. Science and Engineering Investigations. 2013. vol. 2, issue 12. R. 17 – 24.
8. Mostafavi Seyed Alireza, Shirazi Mohammad. Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption. Energy. 2020. Vol. 212. R. 2 -18.
9. Khanmohammadi Shoaib, Shahsavari Amin. Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study). Energy Equipment and Systems. 2020. Vol. 8. No 4. P. 349 – 365.
10. Amir Ebrahimi Moghadam, Mahdi Deymi Dashtebayaz, Hosein Jafari Amir Niazmand. Energetic, exergetic, environmental and economic assessment of a novel control system for indirect heaters in natural gas city gate stations. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. Vol. 141. P. 2573 – 2588.
- 11-1. Horbiichuk M. I., Vasylenchuk M. Z. Syntez strukturnoi skhemy nahrivnyka nafty yak obiekta avtomatichnoho keruvannia VISNYK KhNTU. Inzhenerni nauky № 4(87), 2023. S. 44 – 52.
- 12-2. Horbiichuk M. I., Vasylenchuk M. Z., Kohutiak M. I. Syntez linearyzovanykh matematychnykh modelei nahrivnyka z promizhnym teplonosiem. Mizhnarodnyi naukovo-tehnichnyi zhurnal «Vymiriuvalna ta obchysluvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh», 2023, vyp. 3. S. 144 – 153.
13. Horbiichuk M. I., Vasylenchuk M. Z., Kohutiak M. I. Analitichni doslidzhennia dynamichnykh vlastyvostei priamykh nahrivachiv nafty.
14. Newton, George C., Kaiser, James F. Analytical Design of Linear Feedback Controls New York: J. Wiley and Sons; London: Chapman and Hall, 1957. 419 r.
15. Yanfeng Li, Zhijie Zhang, Xiaojian Hao, Wuliang Yin. A Measurement System for Time Constant of Thermocouple Sensor Based on High Temperature Furnace. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/12/2585>
16. Charin V.S. Liniina alhebra. K.: Tekhnika, 2005. – 413 s.
17. Stephen Boyd, Laurent El Ghaoui, Eric Feron, and Venkatesh Balakrishnan. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. Philadelphia: Siam, 1994. 205 p.
18. Kuster George E. H-infinity Norm Calculation via a State Space Formulation. URL: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/49544/Kuster_GE_T_2013.pdf?isAllowed=y&sequence=1
19. Horbiichuk M. I., Lazoriv N. T., Kohutyk M. I., Manuliak I. Z. Experimental research on muffle furnace dynamic properties. NAUKOVYI VISNYK Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. №3 (195). 2023. S. 144-150.
20. Popovych M. H., Kovalchuk O. V. Teoriia avtomatichnoho keruvannia: pidruchnyk. 2-he vyd., pererob. i dop. K.: Lybid, 2007. 656 s.
21. Newton G. C., Gould L.A., Kaiser J. R. Analytical design of linear feedback controls. New York. John Wiley & Sons, Inc., London. Chapman & Hall, LTD. URL.:
22. Lazariev Yu. F. Dovidnyk z MatLab. K.: NTUU «KPI», 2013. 132 s.
23. Horbiichuk M. I., Harasymiv V. M. Teoriia alhorytmiv, chyslovi metody ta prohramni zasoby modeliuвання: navchalnyi posibnyk. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2021. 313 s.
24. Horbiichuk M. I. Alhorytmy i metody obchyslen: navch. posibnyk. Ivano-Frankivsk: Fakel, 2014. 309 s.