

ГОРБІЙЧУК МИХАЙЛО

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0000-0002-8586-1883>e-mail: mi_profgorb@ukr.net**ВАСИЛЕНЧУК МИХАЙЛО**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0009-0008-9725-052X>e-mail: mischa.blaster@gmail.com

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШЛЯХОВИМ НАГРІВНИКОМ НАФТИ

На відміну від прямих нагрівачів нафти, у яких здійснюється прямий контакт труби, по якій рухається нафта, з полум'ям, у шляхових нагрівачах нагрівання нафти відбувається опосередковано через водяну ванну. У ванні розміщений пучок труб, по яким протікає нафта і жарова труба. У камері згоряння спалюють природний газ, який, рухаючись по жаровій трубі, віддає тепло проміжному теплоносію (воді). Потік тепла від води нагріває нафту, яка рухається пучком труб.

Такий опосередкований процес передачі тепла сприяє рівномірному нагріванню та зменшує ймовірність появи гарячих ділянок. Гарячі ділянки часто виникають у нагрівачах з прямим підігрівом димовими газами в результаті відбувається накопичення відкладень з сторони робочої рідини. Наявність таких ділянок може призвести до деградації обладнання і виникнення аварій.

З іншого боку, наявність водяної ванни значного об'єму спричиняє значну інерційність по каналу «витрата паливного газу-температура нафти на виході нагрівника», що вимагає нових схемо-технічних рішень для покращення показників якості процесу керування.

Синтезована структурна схема системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику, має у своєму складі ПІ- та ПД-регулятори. ПІ-регулятор розміщений у прямому контурі, а ПД-регулятор включений в контур від'ємного зворотного зв'язку, який охоплює об'єкт керування.

Для розрахунку параметрів налаштування ПІ/ПД-регуляторів використаний комбінований метод, який складається з двох етапів.

На першому етапі, використовуючи метод *s*-площини визначають параметри налаштування ПІ/ПД-регуляторів, які є функціями дійсної частини одного із коренів характеристичного рівняння.

На другому етапі мінімізують узагальнений квадратичний критерій якості процесу керування, який є функцією однієї змінної – дійсної частини одного із коренів характеристичного рівняння. Встановлено, що синтезована структурна схема автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику дозволила зменшити час регулювання на 68,9% при відсутності перерегулювання у порівнянні з каскадно-зв'язаною системою автоматичного керування.

Ключові слова: нагрівник нафти, система керування, структура, параметри, ПІ/ПД-регулятори, налаштування.

HORBICHUK MYKHAILO**VASYLENCHUK MYKHAILO**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR A OIL ROAD HEATER

Unlike direct oil heaters, where the pipe carrying the oil comes into direct contact with the flame, in line heaters, the oil is heated indirectly through a water bath. The bath contains a bundle of tubes through which the oil flows, as well as a fire tube. In the combustion chamber, natural gas is burned, and as it moves through the fire tube, it transfers heat to the intermediate heat carrier (water). The heat flows from the water then heats the oil flowing through the tube bundle.

This indirect heat transfer process promotes uniform heating and reduces the likelihood of hot spots. Hot spots often occur in heaters with direct heating by flue gases, leading to the accumulation of deposits on the working fluid side. The presence of such spots can result in equipment degradation and the occurrence of accidents.

On the other hand, the presence of a large-volume water bath causes significant inertia in the "fuel gas flow–oil outlet temperature" control channel, which requires new circuit design solutions to improve control process quality indicators.

The synthesized structural diagram of the automatic control system for the oil heating process in the line heater includes PI and PD controllers. The PI controller is placed in the direct control loop, while the PD controller is included in the negative feedback loop that encompasses the control object. To calculate the tuning parameters of the PI/PD controllers, a combined method was used, consisting of two stages.

In the first stage, the parameters for tuning the PI/PD controllers are determined using the *s*-plane method, where the parameters are functions of the real part of one of the roots of the characteristic equation.

In the second stage, a generalized quadratic quality criterion of the control process is minimized, which is a function of a single variable—the real part of one of the roots of the characteristic equation. It was established that the synthesized structural diagram of the automatic control system for the oil heating process in the line heater reduced the regulation time by 68.9% without overshoot, compared to a cascade-linked automatic control system.

Keywords: oil heater, control system, structure, parameters, PI/PD controllers, settings.

Стаття надійшла до редакції / Received 28.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 16.06.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Шляхові нагрівачі нафти і газу використовують для зменшення в'язкості нафти перед транспортуванням її магістральними трубопроводами або при подачі, видобутої нафти із свердловини, на сепарацію. Нагрівання природного газу в шляховому нагрівачі здійснюється з метою запобігання гідроутворення при пониженні тиску перед подачею в газотранспортну систему або при подачі газу споживачам.

Особливістю шляхового нагрівача є наявність водяної бані, яка є проміжним теплоносієм. У середині водяної бані розміщений пучок труб, якими рухається робоче тіло (нафта або природний газ). У водяній бані знаходиться жарова труба, по якій рухаються гарячі продукти, утворені внаслідок спалювання природного газу в камері згорання.

Потік тепла від жарової труби нагріває проміжний теплоносій у водяній бані, що спричиняє передачу тепла через стінки пучка труб робочому тілу (нафті).

З точки зору динамічної характеристики шляхового нагрівача, як об'єкта автоматичного керування, наявність проміжного теплоносія зумовлює значну його інерційність, що вимагає пошуку нових схемо-технічних рішень для синтезу ефективних систем автоматичного керування.

Аналіз досліджень та публікацій

Оскільки вода, як проміжний теплоносій, займає значний об'єм, то нагрівання такої маси рідини до бажаної температури потребує значних затрат природного газу.

Тому зусилля дослідників були зосереджені на проблемі підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) нагрівника.

Так, у роботі [1] був сконструйований експериментальний шляховий нагрівач газу, на якому проводили дослідження впливу керамічних нанотрубок діаметром 20-30 нм на ефективність процесу теплопередачі. Частка таких трубок у водяній бані становила 0,025, 0,05, 0,1, 0,2 і 0,3 від загального об'єму рідини. Збільшення об'ємної частки збільшило коефіцієнт теплопровідності та коефіцієнти в'язкості, а збільшення числа Нуссельта також збільшило коефіцієнт конвективної теплопередачі, що привело до зростання ефективності роботи нагрівача на 48% при об'ємній частці 0,05 і вихідній температурі газу 70 °С.

Автори роботи [2] досліджували вплив ультразвуку на процес теплопередачі в теплових батареях. З цією метою був створений експериментальний зразок нагрівача. Щоб оцінити вплив ультразвукових коливань, всі випробування проводилися в двох режимах, а саме без вібрації та з вібрацією на різних рівнях потужності ультразвуку. Результати показали на збільшення швидкості теплопередачі при ультразвукової вібрації та при менших витратах рідини і нижчих рівнях потужності нагрівача.

Збільшити коефіцієнт корисної дії можна [3], якщо димові гази використовувати для нагрівання повітря для горіння. Результати показали, що нагрівання повітря зменшить споживання палива та підвищить ефективність обігрівача.

У роботі [4] створено математичну модель шляхового нагрівача газу з використанням законів збереження енергії та маси. Враховувались тепло, поглинене природним газом, тепло, передане в навколишнє середовище від труби і тепло, що втрачається в навколишнє середовище від тіла нагрівача. За допомогою створеної моделі встановлено, що зниження температури і підвищення тиску вхідного газу, потовщення ізоляції зі скласти і збільшення радіуса жарової труби призвело до збільшення теплового ККД нагрівача з 20 до 60% і, як наслідок, зменшилася витрата палива.

Проміжний теплоносій це дистильована вода, для отримання якої необхідні значні енергетичні затрати [5]. Система виробництва дистильованої води складається з сонячного дистильатора та теплообмінника з тепловою трубою, сконструйованого для рекуперації тепла від вихлопу непрямого газового нагрівача. Результати експериментальних досліджень показали економічну ефективність системи та зменшення її негативного впливу на зовнішнє середовище.

Огляд літературних джерел показав, що значно менше уваги приділено питанням ефективного автоматичного керування процесом нагрівання робочого тіла в шляховому нагрівачі.

У цьому плані слід виділити роботу [6], у якій запропоновано оптимальну систему для непрямих нагрівачів водяної бані в газорозподільних станціях міського типу. Процедура оптимізації здійснюється шляхом проектування системи керування для отримання прийнятної температури на виході для нагрівача на основі умов входу газу до міської станції. Контролер розраховує температуру гідратуутворення в перерахунку на тиск прохідного газу і передає цю інформацію на факел нагрівача для регулювання витрати палива.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка та структурно-параметричний синтез ефективної системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти у шляховому нагрівнику з використанням ПІ- та ПД-регуляторів для покращення динамічних показників керування та зменшення часу регулювання процесу нагрівання.

Цілі дослідження:

1. Вивчити та проаналізувати динамічні характеристики шляхових нагрівачів нафти, зокрема, виявити чинники значної інерційності цих об'єктів.
2. Сформулювати та обґрунтувати нову структуру системи автоматичного керування для шляхового нагрівача нафти, яка включатиме ПІ-регулятор у прямому контурі та ПД-регулятор у контурі зворотного

зв'язку.

3. Розробити комбінований метод визначення параметрів налаштування ПІ- та ПД-регуляторів, що складається з двох етапів: методу s-площини для початкового розміщення полюсів і подальшої мінімізації узагальненого квадратичного критерію оптимальності.

4. Реалізувати алгоритм налаштування параметрів ПІ- та ПД-регуляторів у середовищі MatLab та провести чисельні експерименти для визначення оптимальних налаштувань регуляторів.

5. Провести аналіз отриманих результатів щодо часу регулювання та перерегулювання синтезованої системи керування, порівняти їх з існуючими схемами керування.

6. Оцінити ефективність запропонованої системи автоматичного керування шляховим нагрівачем за показниками якості процесу керування та сформулювати рекомендації щодо її практичного застосування.

Виклад основного матеріалу

Дослідження динамічних властивостей шляхового нагрівача нафти показали [7], що такий об'єкт має значну інерційність. Тривалість перехідного процесу про стрибкоподібній зміні вхідної величини становить близько 1,4 год.

Висока інерційність шляхового нагрівача нафти зумовлена наявністю водяної бані, всередині якої розміщені теплообмінні і жарові труби. По теплообмінним трубам протікає робоча рідина (нафта або газовий конденсат), яка отримує тепло від проміжного теплоносія – води. Жарові труби з'єднані з камерою згорання природного газу. Тепло від жарових труб передається проміжному теплоносієві (воді).

Таким чином, вхідною величиною об'єкта керування є подача природного газу до форсунок, які розміщені в камері згорання, а виходом є температура робочої рідини, яка вимірюється термометром опору. На лінії подачі природного газу до форсунок встановлений виконавчий пристрій. Ступінь переміщення регулюючого органу визначається величиною командного сигналу (рис. 1).

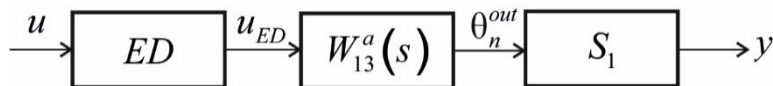


Рис. 1. Структурна схема нагрівача як об'єкта автоматичного керування

На рис.1 прийняті такі позначення: ED – виконавчий пристрій; S_1 – давач температури.

Передавальна функція об'єкта [8] є такою:

$$W_{13}^a(s) = \frac{k_s}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}. \quad (1)$$

Структурна схема синтезованої системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти у шляховому нагрівачі зображена на рис. 2. Система має у своєму складі два регулятори PI та PD , які описуються такими передавальними функціями:

$$W_{PI}(s) = \frac{C_0^{(1)}s + C_1}{s}, \quad (2)$$

$$W_{PD}(s) = C_0^{(2)} + C_2 s, \quad (3)$$

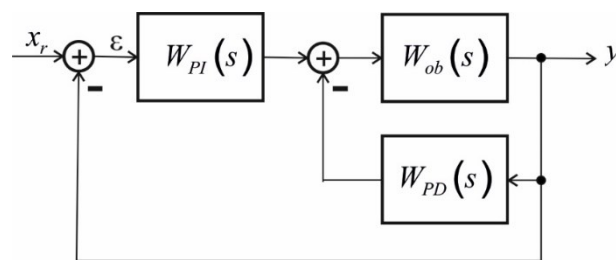


Рис.2. Структурна схема автоматичного керування процесом нагрівання нафти

Об'єкт керування охоплений місцевим від'ємним зворотним зв'язком, у коло якого включений регулятор PD (рис.2).

Після нескладних структурних перетворень отримали передавальну функцію замкненої системи керування (рис. 2)

$$W_{yx_r}(s) = \frac{W_{PI}(s)W_{ob}(s)}{1 + W_{ob}(s)(W_{PD}(s) + W_{PI}(s))}. \quad (4)$$

З врахуванням значень передавальних функцій (1) - (3) передавальна функція (4) буде такою:

$$W_{yx_r}(s) = \frac{k_s (C_0^{(1)}s + C_1)}{a_0 s^3 + (a_1 + k_s C_2)s^2 + (a_2 + k_s C_0)s + k_s C_1}, \quad (5)$$

де $C_0 = C_0^{(1)} + C_0^{(2)}$.

Розв'язували таку задачу: необхідно знайти такі параметри $C_0^{(1)}$, $C_0^{(2)}$, C_1 і C_2 налаштування PI та PD регуляторів, щоб узагальнений квадратичний критерій набув мінімального значення, тобто

$$\min : J = \int_0^{\infty} (\varepsilon^2(t) + \tau^2 \dot{\varepsilon}^2(t)) dt, \quad (6)$$

Існують таблиці [9], за допомогою яких можна обчислити критерій (6), якщо відомі зображення похибки регулювання $\varepsilon(t)$ та її похідної $\dot{\varepsilon}(t)$. У такому випадку

$$J = \frac{1}{J_D} (J_{N1} + \tau^2 J_{N2}). \quad (7)$$

Оскільки $E(s) = L[\varepsilon(t)]$ і $E_1(s) = L[\dot{\varepsilon}(t)]$, то, знаючи зображення за Лапласом $E(s)$, можна обчислити $E_1(s)$ за формулою знаходження зображення від похідної, тобто

$$L[\dot{\varepsilon}(t)] = sE(s) - \varepsilon(0), \quad (8)$$

де $\varepsilon(0) = \lim_{s \rightarrow \infty} sE(s)$.

Очевидно, що $E(s) = W_{\text{exr}}(s) X_r(s)$, де $X_r(s)$ - зображення за Лапласом завдання PI регулятора (рис. 2).

Якщо $x_r(t)$ одинична стрибкоподібна функція, то

$$E(s) = \frac{1}{s} W_{\text{exr}}(s). \quad (9)$$

Із рис. 2 випливає, що

$$W_{\text{exr}}(s) = \frac{1}{1 + W(s)}. \quad (10)$$

Передавальна функція $W(s)$ розімкненої системи (рис. 2) є такою:

$$W(s) = \frac{W_{PI}(s) W_{ob}(s)}{1 + W_{ob}(s) W_{PD}(s)}, \quad (11)$$

З врахуванням (11) формула (10) набуде такого вигляду:

$$W_{\text{exr}}(s) = \frac{1 + W_{ob}(s) W_{PD}(s)}{1 + W_{ob}(s) (W_{PD}(s) + W_{PI}(s))}. \quad (12)$$

Якщо вирази (1) – (3) підставити в (12), то отримаємо

$$W_{\text{exr}}(s) = \frac{(a_0 s^2 + (a_1 + k_s C_2) s + a_2 + k_s C_0^{(2)}) s}{a_0 s^3 + (a_1 + k_s C_2) s^2 + (a_2 + k_s C_0) s + k_s C_1}.$$

Отриманий результат дає змогу знайти зображення похибки керування за формулою (9)

$$E(s) = \frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3}, \quad (13)$$

де $\pi_0 = a_0$, $\pi_1 = a_1 + k_s C_2$, $\pi_2 = a_2 + k_s C_0$, $\pi_3 = k_s C_1$; $b_0 = a_0$, $b_1 = a_1 + k_s C_2$, $b_2 = a_2 + \beta k_s C_0 / (1 + \beta)$.

Значення коефіцієнта β визначає співвідношення між параметрами $C_0^{(1)}$ і $C_0^{(2)}$, тобто $\beta = \frac{C_0^{(2)}}{C_0^{(1)}}$.

Тепер визначимо $E_1(s)$ за формулою (8)

$$E_1(s) = \frac{p_0 s^2 + p_1 s + p_2}{\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3}, \quad (14)$$

де $p_0 = 0$, $p_1 = -k_s C_0 / (1 + \beta)$, $p_2 = -k_s C_1$.

Формули (13) і (14) дають змогу визначити [9] складові у виразі (7)

$$J_{N1} = b_0^2 \pi_2 \pi_3 + (b_1^2 - 2b_0 b_2) \pi_0 \pi_3 + b_2^2 \pi_0 \pi_1, \quad (15)$$

$$J_{N2} = p_0^2 \pi_2 \pi_3 + (p_1^2 - 2p_0 p_2) \pi_0 \pi_3 + p_2^2 \pi_0 \pi_1, \quad (16)$$

$$J_D = 2\pi_0 \pi_3 (\pi_1 \pi_2 - \pi_0 \pi_3). \quad (17)$$

Поставлену задачу будемо вирішувати в два етапи [10]. На першому етапі визначимо параметри налаштування PI та PD регуляторів, використавши метод S – площини [11]. Для цього запишемо систему рівнянь, яка витікає із теореми Вієта

$$\begin{aligned}
s_1 + s_2 + s_3 &= -\frac{\pi_1}{\pi_0}, \\
s_1 s_2 + s_1 s_3 + s_2 s_3 &= \frac{\pi_2}{\pi_0}, \\
s_1 s_2 s_3 &= -\frac{\pi_4}{\pi_0}.
\end{aligned} \tag{18}$$

Допустимо, що два корені s_1 і s_2 характеристичного рівняння $\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3 = 0$ - комплексно-спряжені, а третій корінь s_3 - дійсний. Отже, $s_1 = -\alpha + j\zeta$, $s_2 = -\alpha - j\zeta$ і $s_3 = -k_1\alpha$.

Для того, щоб система керування (рис. 2) була стійкою повинні мати місце такі співвідношення: $\alpha > 0$, $\zeta > 0$ і $k_1 > 0$.

Нехай $\mu = \frac{\zeta}{\alpha}$ ступінь коливальності системи. Тоді $s_1 = -\alpha(1 - j\mu)$ і $s_2 = -\alpha(1 + j\mu)$.

З врахуванням значень коренів s_1 , s_2 , s_3 і параметрів π_0 , π_1 , π_2 , π_3 характеристичного рівняння $\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3 = 0$, із системи алгебраїчних рівнянь (18) отримали

$$\begin{aligned}
k_s C_2 &= \pi_0(2 + k_1)\alpha - a_1, \\
k_s C_0 &= \pi_0(r + 2k_1)\alpha^2 - a_2, \\
k_s C_1 &= \pi_0 r k_1 \alpha^3,
\end{aligned}$$

із якої визначили

$$C_0 = \frac{1}{k_s}(\pi_0(r + 2k_1)\alpha^2 - a_2), \tag{19}$$

$$C_1 = \frac{k_1}{k_s} \pi_0 r \alpha^3, \tag{20}$$

$$C_2 = \frac{1}{k_s}(\pi_0(2 + k_1)\alpha - a_1), \tag{21}$$

де $r = \mu^2 + 1$.

Таким чином, перший етап розв'язування поставленої задачі дав змогу визначити параметри налаштування PI та PD регуляторів, які, при вибраних значеннях ступені коливальності μ і коефіцієнта k_1 , є функціями величини α .

Після підстановки значень C_0 , C_1 і C_2 у формули (15) – (17), визначили узагальнений критерій оптимальності J , який є функцією дійсної частини α коренів s_1 і s_2 .

Отже, на другому етапі шукали локальний мінімум функції $J(\alpha)$ на інтервалі $\alpha \in [\alpha_1; \alpha_2]$ за умови, що на цьому інтервалі мають місце такі співвідношення: $C_0 > 0$, $C_1 > 0$ і $C_2 > 0$.

Знайдене значення α , яке мінімізує критерій (7), дає змогу за формулами (19) – (21) визначити оптимальні параметри налаштування PI та PD регуляторів. При цьому необхідно вибрати значення величин μ , k_1 , β і τ .

У роботі [12] наведені параметри передавальної функції (1), а саме: $a_0 = 1,4118 \cdot 10^5$; $a_1 = 771,85$; $a_2 = 1$; $k_s = 0,8173$.

У середовищі MatLab створене програмне забезпечення, яке реалізує розроблений комбінований алгоритм визначення параметрів налаштування PI та PD регуляторів.

Вибір числового значення τ здійснено [13] у відповідності з умовою: $\frac{t_c}{6} < \tau < \frac{t_c}{3}$. При бажаному часі регулювання $t_c = 120$ с, маємо $20 < \tau < 40$. Було взято $\tau = 25$ с. Інші параметри були такими: $\mu = 0,2$; $k_1 = 1,5$.

З аналізу формул (13) - (17) зроблений висновок, що на значення критерію (7) впливає величина β , яка визначає співвідношення між параметрами налаштування $C_0^{(1)}$ і $C_0^{(2)}$ PI та PD регуляторів. Для виявлення такого впливу був проведений комп'ютерний експеримент. Значення величини β змінювали в межах від 0,1 до 0,7 і обчислювали значення параметрів налаштування PI та PD регуляторів, а також мінімізували критерій (7) та за формулами (19) – (21) обчислювали параметри налаштування PI та PD регуляторів. За допомогою програмного забезпечення, створеного в середовищі MatLab, будували графіки перехідних процесів для

кожного значення β_i із інтервалу $\beta \in [0,2; 0,7]$, що дало змогу визначити час регулювання і перерегулювання. Для всіх значення β_i із вибраного інтервалу залежність $J(\beta)$ зображена на рис. 3.

Мінімальному значенню $J(\beta)$ відповідає значення $\beta^*=0,3280$ (рис. 3). Для визначеного значення β^* побудували графік (рис. 4) залежності $J(\alpha)$, визначений на інтервалі значень $\alpha \in [\alpha_1; \alpha_2]$, на якому виконані умови $C_0 > 0$, $C_1 > 0$ і $C_2 > 0$.

У результаті розв'язування задачі $\min_{\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2} J(\alpha)$ отримали: $\alpha^* = 4.6810 \cdot 10^{-2}$ і $J(\alpha^*) = 28,779$.

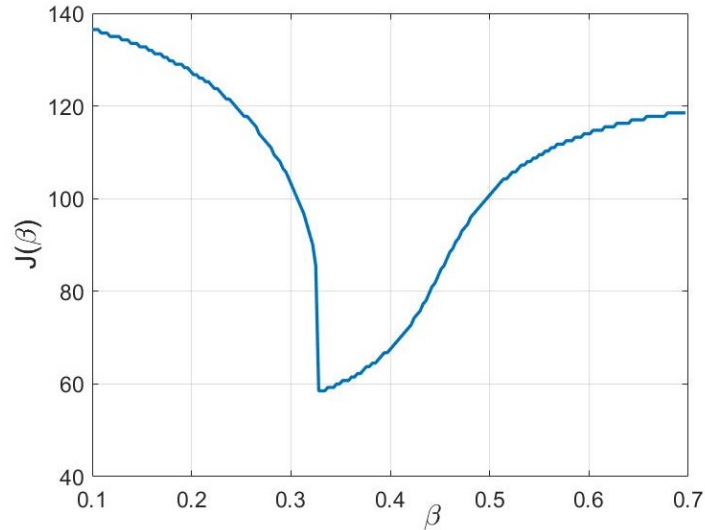


Рис. 3. Графік залежності часу регулювання t_c від співвідношення параметрів $\beta = C_0^{(2)} / C_0^{(1)}$

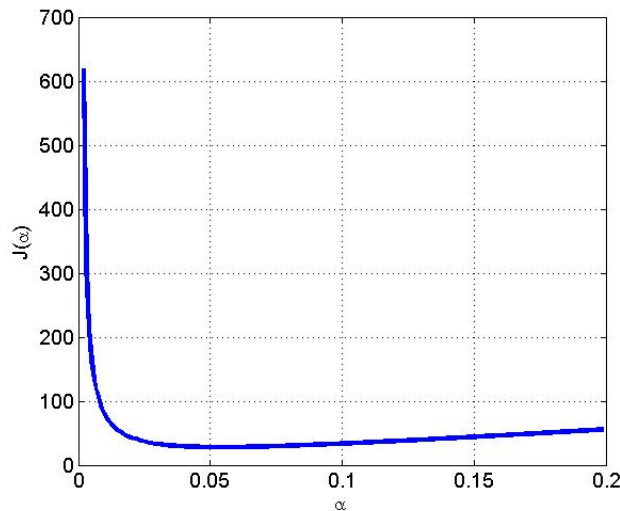


Рис. 4. Графік залежності $J(\alpha)$

Після підстановки значення α^* в формули (19) – (21) отримали параметри налаштування PI та PD регуляторів: $C_0^{(1)} = 1.1506 \cdot 10^3$; $C_0^{(2)} = 3.7738 \cdot 10^2$; $C_1 = 18,427$; $C_2 = 2.7357 \cdot 10^4$.

Графік перехідного процесу замкненої системи керування (рис. 2) в координатах – завдання PI регулятора – вихід – зображений на рис. 5.

За графіком перехідного процесу (рис. 5) визначили, що час регулювання $t_c = 58,5$ с, а перерегулювання – відсутнє.

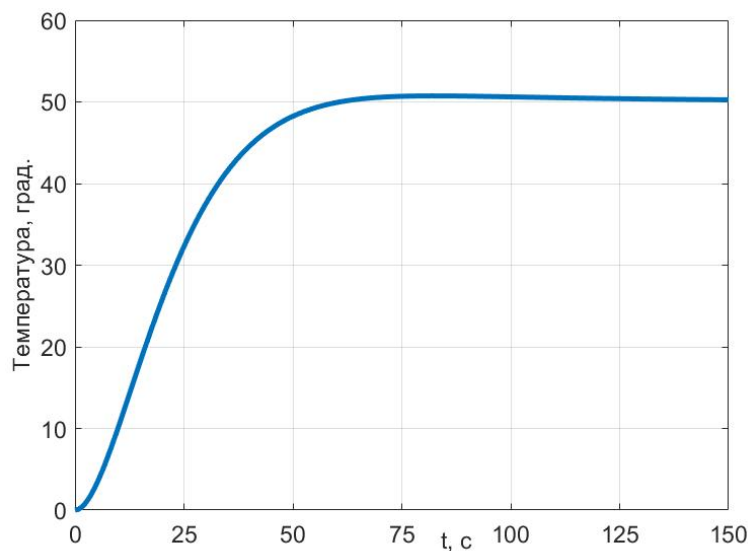


Рис. 4. Графік перехідного процесу замкненої системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Встановлено, що непрямий шляховик нагрівання нафти (газу), як об'єкт автоматичного керування має значну інерційність, що зумовлює пошук нових схемо-технічних рішень для синтезу ефективних систем керування.
2. Запропонована нова структура системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти у шляховому нагрівнику, має у своєму складі ПІ-регулятор у прямому контурі керування та ПД-регулятор, який включений зустрічно-паралельно до об'єкта керування і реалізує від'ємний зворотний зв'язок.
3. Визначення параметрів налаштування ПІ/ПД-регуляторів здійснено комбінованим методом, який включає в себе два етапи. На першому етапі визначені параметри налаштування регуляторів за методом розміщення полюсів на s -площині (площині коренів), які є функціями дійсної частини одного з коренів характеристичного рівняння замкненої системи керування. На другому етапі здійснена мінімізація узагальненого квадратичного критерію за величиною дійсного кореня характеристичного рівняння.
4. За допомогою розробленого програмного забезпечення в середовищі MatLab встановлено, що синтезована структурна схема автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику дозволила зменшити час регулювання на 68,9% при відсутності перерегулювання у порівнянні з каскадно-зв'язаною системою автоматичного керування.

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*. – 2018. – Vol. 134. – P. 107–117.
2. Amin Amiri Delouei, Hooman Naeimi, Hassan Sajjadi, Meysam Atashafrooz, Meysam Imanparas, Ali J. Chamkha. An active approach to heat transfer enhancement in indirect heaters of city gate stations: An experimental modeling // *Applied Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 23.
3. 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*. – 2013. – Vol. 2, Issue 12. – P. 17–24.
4. Khanmohammadi S., Shahsavari A. Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study) // *Energy Equip. Sys.* – 2020. – Vol. 8, No. 4. – P. 349–365.
5. Distilled water production with combination of solar still and thermosyphon heat pipe heat exchanger coupled with indirect water bath heater – Experimental study and thermoeconomic analysis.
6. Ebrahimi Moghadam A., Deymi Dashtebayaz M., Amir Niazmand H. J. Energetic, exergetic, environmental and economic assessment of a novel control system for indirect heaters in natural gas city gate station // *Journal of Thermal*.
7. Horbiichuk M.I., Vasylenchuk M.Z., Kohutiak M.I. Analytical studies on dynamic properties of indirect oil heaters // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2024. – № 6. – P. 151–157.
8. Горбійчук М.І., Василенчук М.З. Синтез структурної схеми нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування // *Вісник ХНТУ. Інженерні науки*. – 2023. – № 4(87). – С. 44–52.
9. Newton G.C., Kaiser J.F. *Analytical Design of Linear Feedback Controls*. – New York: J. Wiley and Sons;

London: Chapman and Hall, 1957. – 419 p.

10. Horbiichuk M., Vasylenchuk M., Yednak I., Lahoida A. Devising a combined method for setting PI/PID controller parameters for oil and gas facilities // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2025. – № 1(2)(133). – P. 85–95.

11. Gorbiiichuk M., Lazoriv N., Chyhur L., Chyhur I. Determining configuration parameters for proportionally integrated differentiating controllers by arranging the poles of the transfer function on the complex plane // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – № 5(2)(113). – P. 80–93.

12. Горбійчук М.І., Василенчук М.З., Когутяк М.І. Система автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 2024. – № 1. – С. 314–331.

13. Горбійчук М.І., Поварчук Д.Д. Метод налаштування параметрів ПІ- і ПІД-регуляторів системи автоматичного керування процесом двоступеневої сепарації нафти // *Науковий вісник ІФНТУНГ*. – 2017. – № 2(43). – С. 89–95.

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*. – 2018. – Vol. 134. – P. 107–117.

2. Amin Amiri Delouei, Hooman Naeimi, Hassan Sajjadi, Meysam Atashafrooz, Meysam Imanparas, Ali J. Chamkha. An active approach to heat transfer enhancement in indirect heaters of city gate stations: An experimental modeling // *Applied Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 23.

3. 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*. – 2013. – Vol. 2, Issue 12. – P. 17–24.

4. Khanmohammadi S., Shahsavari A. Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study) // *Energy Equip. Sys.* – 2020. – Vol. 8, No. 4. – P. 349–365.

5. Distilled water production with combination of solar still and thermosyphon heat pipe heat exchanger coupled with indirect water bath heater – Experimental study and thermoeconomic analysis.

6. Ebrahimi Moghadam A., Deymi Dashtebayaz M., Amir Niazmand H. J. Energetic, exergetic, environmental and economic assessment of a novel control system for indirect heaters in natural gas city gate station // *Journal of Thermal*.

7. Horbiichuk M.I., Vasylenchuk M.Z., Kohutiak M.I. Analytical studies on dynamic properties of indirect oil heaters // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2024. – № 6. – P. 151–157.

8. Horbiichuk M.I., Vasylenchuk M.Z. Syntez strukturnoi skhemy nahrivnyka nafty yak obiekta avtomatychnoho keruvannya // *Visnyk KhNTU. Inzhenerni nauky* – 2023. – № 4(87). – С. 44–52.

9. Newton G.C., Kaiser J.F. Analytical Design of Linear Feedback Controls. – New York: J. Wiley and Sons; London: Chapman and Hall, 1957. – 419 p.

10. Horbiichuk M., Vasylenchuk M., Yednak I., Lahoida A. Devising a combined method for setting PI/PID controller parameters for oil and gas facilities // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2025. – № 1(2)(133). – P. 85–95.

11. Gorbiiichuk M., Lazoriv N., Chyhur L., Chyhur I. Determining configuration parameters for proportionally integrated differentiating controllers by arranging the poles of the transfer function on the complex plane // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – № 5(2)(113). – P. 80–93.

12. Horbiichuk M.I., Vasylenchuk I.Z., Kohutiak M.I. Systema avtomatychnoho keruvannya protsesom nahrivannya nafty v shliakhovomu nahrivnyku // *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*. – 2024. – № 1. – С. 314–331.

13. Horbiichuk M.I., Povarchuk D.D. Metod nalashtuvannya parametriv PI- i PID-rehuliatoriv systemy avtomatychnoho keruvannya protsesom dvostupenevoi separatsii nafty // *Naukovyi visnyk IFNTUNH*. – 2017. – № 2(43). – С. 89–95.