

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Василенчук Михайло Зеновійович

УДК 681.5:624.7

ДИСЕРТАЦІЯ
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І СИНТЕЗ СИСТЕМИ
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПІДГРІВНИКОМ НАФТИ З
ПРОМІЖНИМ НОСІЄМ

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

15 – Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Василенчук М.З.

Науковий керівник: **Горбійчук Михайло Іванович**

доктор технічних наук, професор

Івано-Франківськ – 2026

АНОТАЦІЯ

Василенчук М.З. «Математичне моделювання і синтез системи автоматичного керування підігрівником нафти з проміжним носієм» – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – Івано–Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано–Франківськ, 2026.

У дисертації зроблені дослідження непрямих нагрівачів нафти і газу з водяною ванною. Через високу в'язкість і наявність парафіну у нафті і через утворення гідратів при транспортуванні газу існує необхідність їх підігрівання. Прямі нагрівачі нафти і газу попри високу ефективність створюють небезпеку руйнування шляхів транспортування продуктів. Непрямі ж нагрівачі дозволяють при меншій ефективності і більшій інерційності рівномірно розігрівати продукти нагрівання. Але відсутність адекватної математичної моделі, яка б описувала процес нагрівання нафти в непрямому нагрівачі як об'єкта автоматичного керування, створює необхідність синтезу такої моделі як основу для синтезу системи автоматичного керування процесом нагрівання.

У першому розділі «Аналіз наукових джерел за темою дисертаційної роботи» виконано огляд публікацій, пов'язаних з непрямыми нагрівачами, а саме з методами керування нагріванням нафтою і газом, способами оптимізації компонентів нагрівачів для досягнення вищої ефективності і підвищення коефіцієнта теплопередачі, системами автоматичного керування нагріванням. Обґрунтовано вибір тематики дослідження. На підставі розглянутих літературних джерел визначено актуальність створення математичної моделі та системи автоматичного керування нагрівником з проміжним теплоносієм. Вона полягає у проведенні досліджень, які б описували динамічних властивостей непрямого нагрівника як об'єкта автоматичного керування з метою синтезу автоматичної системи керування процесом нагріву робочого тіла (нафти).

У другому розділі «Математична модель непрямого нагрівника з проміжним теплоносієм» детально розкрито специфіку теплофізичних процесів у нагрівачах непрямого типу, де ключовим елементом є водяна баня, де вода виконує роль проміжного теплоносія для буферної передачі енергії. Важливим етапом дослідження став синтез функціональної схеми об'єкта, який було здійснено на основі детального аналізу роботи реального промислового нагрівача. Це дозволило чітко формалізувати структуру взаємодій у непрямому нагрівачі, виділивши керуючі впливи та збурення, а також обґрунтувати, як водяна ванна нівелює ризики перегріву нафти та підвищує безпеку експлуатації у вибухонебезпечних зонах.

Математичний опис базується на представленні нагрівача як системи із зосередженими параметрами, де для кожного елемента прийнято допущення про усереднення температури. Модель враховує складний характер теплообміну, який включає радіаційну та конвективну складові при передачі тепла від димових газів до стінок, а також конвекцію від стінок до рідин. Ключовим моментом є врахування акумулюючої здатності масивних елементів конструкції та великого об'єму води, що вводить у динаміку системи значну теплову інерцію, яку описують через диференціальні рівняння теплового балансу.

Окремий акцент зроблено на переході від нелінійної моделі до лінійної динамічної моделі, придатної для синтезу систем керування. У роботі використано розклад у ряд Тейлора для лінеаризації рівнянь в околиці робочої точки, оскільки реальні відхилення параметрів у сталому режимі є незначними. Це дозволило отримати набір передавальних функцій та побудувати структурну схему, яка математично зв'язує ступінь відкриття паливного клапана з вихідною температурою нафти, створюючи фундамент для проєктування систем автоматичного керування.

У третьому розділі «Дослідження динамічних властивостей шляхового нагрівача нафти з проміжним теплоносієм» здійснено розрахунок параметрів статичного режиму, що є необхідною умовою для подальшої лінеаризації

моделі. Шляхом прирівнювання похідних до нуля сформовано систему алгебраїчних рівнянь, розв'язок якої дозволив знайти базові значення температур у всіх вузлах нагрівача та визначити коефіцієнти теплопередачі для конкретної робочої точки. Це стало фундаментом для обчислення параметрів шести передавальних функцій, які описують взаємозв'язки між входами та виходами системи.

Аналіз отриманих передавальних функцій виявив ключову проблему для подальшого синтезу системи керування — високий (восьмий) порядок математичної моделі. Така складність зумовлена врахуванням теплової інерції багатьох конструктивних елементів, зокрема значної маси води та металоконструкцій. Дослідження перехідних процесів підтвердило, що система є стійкою, але має значну інерційність з довготривалими перехідними процесами. Проте високий порядок моделі створює суттєві труднощі при розрахунку налаштувань промислових регуляторів.

Для вирішення цієї проблеми у розділі застосовано метод редукції моделі на основі сингулярних чисел Генкеля. Суть методу полягала в аналізі енергетичного вкладу кожного стану в динаміку системи. Відкинувши стани з незначними сингулярними числами, вдалося апроксимувати складну динаміку восьмого порядку моделями другого та третього порядків. Це дозволило суттєво спростити структуру моделі без втрати фізичного змісту процесів.

Верифікація спрощених моделей, проведена шляхом порівняльного аналізу в часовій та частотній областях, продемонструвала високу точність апроксимації. Порівняння перехідних характеристик та логарифмічних частотних характеристик вихідної та редукованої моделей показало мінімальні похибки, які для основних каналів не перевищують пів відсотка. Також частотний аналіз підтвердив, що нагрівач за каналами збурень діє як фільтр низьких частот, ефективно згладжуючи високочастотні коливання вхідних сигналів, що є важливим нюансом для проєктування стійкої системи автоматичного керування.

В четвертому розділі «Синтез систем автоматичного керування нагрівником нафти з проміжним теплоносієм» синтезовано чотири варіанти систем автоматичного керування процесом нагрівання нафти: одноконтурну, каскадно-зв'язану, структурно-параметричну та інваріантну системи автоматичного керування. Для визначення параметрів налаштування регуляторів, які є елементами запропонованих систем керування, розроблений узагальнений метод, в основі якого лежить такий вибір коренів характеристичного рівняння системи, щоб квадратичний критерій якості керування набув мінімального значення.

Синтезована одноконтурна система за основним каналом «подача паливного газу – температура нафти на виході», яка, крім об'єкта керування, має у своєму складі давач температури, ПІ-регулятор і виконавчий пристрій. Параметри налаштування ПІ-регулятора обчислені в результаті розв'язання оптимізаційної задачі з узагальненим критерієм якості керування. Зроблені розрахунки установили, що при відсутності перерегулювання час регулювання становить 4200 с, що є неприйнятним.

Запропонована каскадно-зв'язана система автоматичного керування нагрівачем з проміжним теплоносієм, крім основного контуру, має у своєму складі допоміжний контур «подача паливного газу – температура димових газів», який має значно меншу інерційність у порівнянні з основним контуром. Комп'ютерне моделювання каскадно-зв'язаної системи керування показало істотне зменшення часу регулювання до 48,2 с при збільшенні перерегулюванні до 33,7%. Таке значення перерегулювання може бути неприйнятним в реальних умовах.

Покращення якості процесу керування було досягнуто за допомогою структурно-параметричного рішення шляхом включення в основний контур керування, який вміщує ПІ-регулятор, додатково ПД-регулятора паралельно з об'єктом керування.. Доказано, що синтезована структурно-параметрична система автоматичного керування, дала змогу значно зменшити час регулювання (до 58,5 с) у порівнянні з одноконтурною системою при

відсутності перерегулювання. При відсутності перерегулювання час регулювання у порівнянні з каскадно-зв'язаною системою дещо збільшився, що зумовило вибір системи з ПІ/ПД-регулятором як основної.

Усунення негативного впливу збурень – температури і витрати нафти на вхід в нагрівач - на якість процесу керування досягнуто шляхом синтезу двох параметричної інваріантної системи керування основним елементом якої є компенсатор збурень. Показано, що фізична реалізація компенсатора збурень можлива за умови редукції моделей передавальних функцій збурень. Імітаційне модулювання інваріантної системи в середовищі MatLab дало змогу встановити, що відбувається повна компенсація збурень при синусоїдальному сигналові та при випадковому сигналові з гаусовим розподілом.

На засобах мікропроцесорної техніки реалізований компенсатор збурень як цифровий коректор. Результати тестування роботи коректора з використанням Oscilloscope середовища розробки EcoStruxure Machine Expert – HVAC довели правильність прийнятих рішень при переході від неперервного представлення моделі компенсатора до її дискретного аналогу.

Основні наукові результати дисертації опубліковано в 15 працях, зокрема: 2 статті – у виданнях, що індексуються в науко метричних базах даних Scopus, 6 статей – у фахових виданнях України, 7 публікацій – у збірниках наукових праць конференцій.

Ключові слова: автоматизація, математична модель, автоматизація нагрівальних апаратів, система автоматичного керування, синтез системи керування, передавальна функція, перехідний процес, ідентифікація об'єкта керування, керування температурним режимом, апроксимація, редукція моделі, оптимізація, компенсація збурень, програмне забезпечення, імітаційне моделювання.

ABSTRACT

Vasylenchuk M.Z. Mathematical Modeling and Synthesis of an Automatic Control System for an Intermediate Medium Heater. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 174 "Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics". – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2025.

The dissertation investigates indirect water-bath heaters for oil and gas. Due to high viscosity and paraffin content in oil, as well as the formation of hydrates during gas transportation, there is a necessity for their heating. Direct oil and gas heaters, despite their high efficiency, pose a risk of damaging product transportation pipelines. Conversely, indirect heaters provide uniform heating of the products, albeit with lower efficiency and higher inertia. However, the lack of an adequate mathematical model describing the heating process in an indirect heater as an object of automatic control necessitates the synthesis of such a model as the basis for developing an automatic control system for the heating process.

In the first chapter, "Analysis of Scientific Sources on the Dissertation Topic" a review of publications related to indirect heaters is conducted, specifically focusing on oil and gas heating control methods, techniques for optimizing heater components to achieve higher efficiency and increase the heat transfer coefficient, and automatic heating control systems. The choice of the research topic is justified. Based on the reviewed literature, the relevance of developing a mathematical model and an automatic control system for a heater with an intermediate heat carrier is established. This relevance lies in conducting research to describe the dynamic properties of the indirect heater as an object of automatic control for the purpose of synthesizing an automatic control system for the working medium (oil) heating process.

In the second chapter, "Mathematical Model of an Indirect Heater with an Intermediate Heat Carrier," the specifics of thermophysical processes in indirect heaters are disclosed in detail. The key element is the water bath, where water serves

as an intermediate coolant for buffered energy transfer. A vital stage of the research was the synthesis of the object's functional diagram, conducted based on a detailed analysis of a real industrial heater's operation. This allowed for a clear formalization of the interaction structure within the indirect heater, identifying control actions and disturbances, and justifying how the water bath mitigates oil overheating risks and enhances operational safety in explosive zones.

The mathematical description is based on representing the heater as a lumped parameter system, where temperature averaging is assumed for each element. The model accounts for the complex nature of heat exchange, including radiative and convective components during heat transfer from flue gases to the walls, as well as convection from the walls to the liquids. A key point is accounting for the heat storage capacity of massive structural elements and the large volume of water, which introduces significant thermal inertia into the system dynamics, described via differential heat balance equations.

A separate emphasis is placed on the transition from a nonlinear model to a linear dynamic model suitable for control system synthesis. Taylor series expansion was utilized to linearize the equations in the vicinity of the operating point, as real parameter deviations in steady-state mode are negligible. This enabled the derivation of a set of transfer functions and the construction of a structural diagram that mathematically links the fuel valve opening degree to the output oil temperature, creating a foundation for designing automatic control systems.

In the third section, "Study of the dynamic properties of a road oil heater with an intermediate coolant", the static mode parameters are calculated, which is a necessary condition for further linearization of the model. By equating derivatives to zero, a system of algebraic equations was formed, the solution of which allowed for finding the base temperature values at all heater nodes and determining the heat transfer coefficients for a specific operating point. This became the foundation for calculating the parameters of six transfer functions that describe the relationships between the system's inputs and outputs.

Analysis of the transfer functions obtained revealed a key problem for further control system synthesis: the high (8th) order of the mathematical model. This complexity is caused by accounting for the thermal inertia of many structural elements, particularly the significant mass of water and metal structures. Investigation of transient processes confirmed that the system is stable but possesses significant inertia with long-lasting transients. However, the high order of the model creates substantial difficulties when calculating the settings for industrial controllers.

To solve this problem, the chapter applies a model reduction method based on Hankel singular values. The essence of the method lies in analyzing the energy contribution of each state to the system dynamics. By discarding states with insignificant singular values, it was possible to approximate the complex 8th-order dynamics with 2nd and 3rd-order models. This allowed for a significant simplification of the model structure without losing the physical meaning of the processes.

Verification of the simplified models, conducted through comparative analysis in the time and frequency domains, demonstrated high approximation accuracy. A comparison of transient characteristics and logarithmic frequency characteristics (Bode plots) of the original and reduced models showed minimal errors, which do not exceed 0.5% for the main channels. Additionally, frequency analysis confirmed that the heater acts as a low-pass filter regarding disturbance channels, effectively smoothing high-frequency fluctuations of input signals, which is an important nuance for designing a stable automatic control system.

In the fourth chapter, “Synthesis of Automatic Control Systems for an Oil Heater with an Intermediate Heat Carrier” four variants of automatic control systems (ACS) for the oil heating process were synthesized: a single-loop system, a cascade system, a structural-parametric system, and an invariant control system. To determine the tuning parameters for the controllers, which are elements of the proposed control systems, a generalized method was developed. This method is based on selecting the roots of the system's characteristic equation such that the quadratic performance criterion (quality criterion) achieves a minimum value.

A single-loop system was synthesized for the main channel 'fuel gas supply – outlet oil temperature,' which, in addition to the control object, comprises a temperature sensor, a PI controller, and an actuator. The tuning parameters of the PI controller were calculated by solving an optimization problem using the generalized performance criterion. The calculations established that in the absence of overshoot, the settling time is 4200 s, which is unacceptable.

The proposed cascade automatic control system for the heater with an intermediate heat carrier includes, in addition to the main loop, an auxiliary (inner) loop 'fuel gas supply – flue gas temperature,' which possesses significantly lower inertia compared to the main loop. Computer simulation of the cascade control system demonstrated a substantial reduction in settling time to 48.2 s, accompanied by an increase in overshoot to 33.7%. Such an overshoot value may be unacceptable under real operating conditions.

Improvement of the control process quality was achieved through a structural-parametric solution by including an additional PD controller in the main control loop (which contains a PI controller) in parallel with the control object. It was demonstrated that the synthesized structural-parametric automatic control system allowed for a significant reduction in settling time (to 58.5 s) compared to the single-loop system, with no overshoot. While the settling time slightly increased compared to the cascade system (in the absence of overshoot), this result justified the selection of the system with the PI/PD controller as the primary one.

Elimination of the negative impact of disturbances—specifically, inlet oil temperature and flow rate—on control quality was achieved by synthesizing a two-parameter invariant control system, the main element of which is a disturbance compensator. It is shown that the physical realization of the disturbance compensator is possible provided that the disturbance transfer function models are reduced. Simulation modeling of the invariant system in the MATLAB environment established that full compensation occurs for both sinusoidal signals and random signals with a Gaussian distribution.

The disturbance compensator was implemented as a digital corrector using microprocessor-based hardware. Testing results of the corrector's operation, using the Oscilloscope feature of the EcoStruxure Machine Expert – HVAC development environment, validated the decisions made during the transition from the continuous representation of the compensator model to its discrete analog.

The main scientific results are published in 15 papers, including:

2 articles in scientometric-indexed journals, 6 in Ukrainian professional journals, and 7 conference proceedings.

Keywords: automation, mathematical model, automation of heating equipment, automatic control system, control system synthesis, transfer function, transient process, control object identification, temperature control, approximation, model reduction, optimization, disturbance compensation, software, simulation modeling.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

[1] М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук, та М. І. Когутяк, «Синтез лінеаризованих математичних моделей нагрівника з проміжним теплоносієм», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, вип. 3, с. 144–153, 2023. doi: 10.31891/2219-9365-2023-75-17. (Фахове наукове видання України категорії Б). Здобувач проаналізував синтезовану математичну модель нагрівника, на основі математичної моделі шляхового нагрівача здійснив математичні перетворення шляхом лінеаризації відповідних рівнянь, які описують зміну температур в нагрівачі, а також за допомогою відповідних матричних перетворень синтезував передавальні функції у термінах «вхід-вихід» як відношення двох поліномів і показав, що порядки поліномів чисельника не більше порядків полінома знаменника, що відповідає фізичній сутності процесу нагріву нафти. Горбійчук М.І. надав рекомендації щодо лінеаризації математичної моделі і синтезу передавальних функцій, надав оцінку отриманих результатів. Когутяк М.І. проконсультував щодо технологічної і функціональної схеми нагрівника, а також параметрів математичної моделі.

[2] М. І. Горбійчук та М. З. Василенчук, "Синтез структурної схеми нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування," *ВІСНИК ХНТУ. Інженерні науки*, № 4(87), с. 44–52, 2023. doi: 10.35546/kntu2078-4481.2023.4.5. (Фахове наукове видання України категорії Б). Здобувач здійснив синтез передавальних функцій шляхом лінеаризації математичної моделі, перетвореної методом Коші, після чого синтезував матрично-векторні рівняння. Здійснив побудову структурної схеми нагрівача яка слугуватиме основою для синтезу системи автоматичного керування. Горбійчук М.І. надав методичні рекомендації для синтезу передавальних функцій і на їх основі структурної схеми непрямого нагрівача.

[3] М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук та М. І. Когутяк, "Система автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику," *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 4, с. 314–331, 2024. doi: 10.31891/2219-9365-2024-80-39. (Фахове наукове видання України категорії Б). Здобувач побудував структурну схему каскадно-зв'язаної системи автоматичного керування, а також здійснив редукцію передавальних функцій сингулярними числами Генкеля і методом площ, що дозволило знизити порядок передавальних функцій з 19 до 6, визначив умови стійкості системи за критерієм Гурвіца-Рауса, а також створив необхідне програмне забезпечення. Горбійчук М.І. проаналізував перехідні характеристики нагрівача, перевірів результати редукції передавальних функцій. Когутяк М.І. консультував щодо створення програмного забезпечення в MatLab для оцінки результатів редукції передавальних функцій.

[4] М. І. Horbiichuk, M. Z. Vasylenchuk and I. Kohutiak, "Analytical studies on dynamic properties of indirect oil heaters," *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 6, pp. 151–157, 2024. doi: 10.33271/nvngu/2024-6/151. (Фахове наукове видання України категорії А, реферується наукометричною базою «Scopus» Q3). Здобувач дослідив значення статичних параметрів системи автоматичного керування нагрівником, здійснив редукцію передавальних функцій нагрівника і проаналізував отримані результати за допомогою програмного продукту MatLab. Горбійчук М.І. допоміг з аналізом паспорту об'єкта(непрямого нагрівача) для визначення даних для калькуляцій. Когутяк М.І. консультував щодо побудови програмного забезпечення для аналізу результатів редукції моделей.

[5] М. Горбійчук, М. Василенчук та М. Когутяк, "Дослідження динамічних властивостей непрямого нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування," *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, № 2(49), с. 29–40, 2024. doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321350. (Фахове наукове видання України категорії Б). Здобувач створив структурно-параметричну схему нагрівника і схему теплових потоків,

в яких вхідними величинами виступають температура нафти на вході, керуюча дія і масова витрата нафти. Вихідними ж величинами є температура нафти на виході і температура димових газів. Після чого на основі допущень синтезував лінеаризовану математичну модель, на їх основі передавальні функції, які лягли в основу побудованої структурної схеми нагрівача з проміжним теплоносієм. Горбійчук М.І. проаналізував отримані результати математичного моделювання проміжного підігрівача. Когутяк М.І. надав рекомендації для синтезу структурних схем непрямого нагрівача.

[6] M. Horbiichuk, M. Vasylenchuk, I. Yednak and A. Lahoida, "Devising a combined method for setting PI/PID controller parameters for oil and gas facilities," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 2(133), pp. 85–95, 2025. doi: 10.15587/1729-4061.2025.322424. (Фахове наукове видання України категорії А, реферується наукометричною базою «Scopus» Q3). Здобувач здійснив визначення параметрів налаштування і показників якості керування для систем автоматичного керування першого і третього порядків, а саме застосував методи s -площини і узагальненого квадратичного критерію для створення алгоритму покращення параметрів налаштування і якості регулювання, а також побудував алгоритм роботи розробленого комбінованого методу налаштування ПІ/ПІД регуляторів, здійснив порівняння розроблених параметрів налаштування комбінованого методу з методом s -площини. Mykhailo Horbiichuk надав рекомендації щодо роботи методу s -площини і можливостей вдосконалення його за допомогою узагальненого квадратичного критерію. Ihor Yednak здійснив визначення параметрів налаштування і показників якості керування для систем автоматичного керування другого порядку. Andrii Lahoida розробив відповідне програмне забезпечення для побудови графіків відповідних функцій і перехідних характеристик.

[7] М. Василенчук та М. Горбійчук, "Структурно-параметричний синтез системи автоматичного керування шляховим нагрівником нафти," *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, т. 355, № 4, с. 112–119, 2025. doi: 10.31891/2307-5732-2025-355-16. (Фахове наукове видання України

категорії Б). Здобувач за допомогою структурно-параметричного синтезу визначив передавальні функції, які реалізуються за допомогою розробленого комбінованого методу налаштування ПІ/ПД регуляторів, а також створив програмне забезпечення, яке дозволило визначити параметри налаштування ПІ та ПД регуляторів. Горбійчук М. верифікував отримані результати і допоміг з формуванням висновків.

[8] М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук та М. І. Когутяк, "Інваріантна система автоматичного керування шляховим нагрівачем нафти," *ВІСНИК ХНТУ. Інженерні науки*, т. 1, № 3(94), с. 57–69, 2025. doi: 10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.7. (Фахове наукове видання України категорії Б). Здобувач здійснив синтез структурної схеми інваріантної системи керування, вивів передавальні функції – компенсатори збурень, здійснив відповідні структурні перетворення структурної схеми нагрівача, створив відповідне програмне забезпечення для аналізу роботи розробленого коректора в відповідному програмному забезпеченні і протестував його на промисловому контролері. М. І. Горбійчук провів оцінку результатів роботи синтезованої системи автоматичного керування. М. І. Когутяк консультував з роботою над програмним забезпеченням промислового контролера.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

[9] М. І. Горбійчук та М. З. Василенчук, "Лінеаризована математична модель підігрівника з проміжним теплоносієм," у *Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості»*, Івано-Франківськ, 12 жовт. 2023, с. 205–207. <https://drive.google.com/file/d/12EjNUZT030GWRivLTyI96qJ4svGTnCgp/view>. Здобувач презентував лінеаризовану математичну модель. Горбійчук М.І. надав рекомендації для висвітлення отриманих результатів математичного моделювання. Когутяк М.І. допоміг з постановкою завдання.

[10] М. І. Горбійчук та М. З. Василенчук, "Синтез структурної схеми нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування," у *X Міжнар. наук.-*

практ. конф. «Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки та освіти», Львів, 9–10 січ. 2024, с. 74–76. <http://www.lviv-forum.inf.ua/save/2024/9-10.01/Збірник.pdf>. Здобувач презентував передавальні функції і структурну схему нагрівача. Горбійчук М.І. допоміг з визначенням висновків для презентації.

[11] М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук та М. І. Когутяк, "Дослідження динамічних властивостей непрямого нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування," у Всеукр. інтернет-конф. молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості», Івано-Франківськ, 10 жовт. 2024, с. 50–52. https://drive.google.com/file/d/1XrD-obOLO_MBz3DuotBYS4S7fKqyctmFS/view. Здобувач презентував схеми непрямого нагрівача, в якому вхідними величинами виступають температура нафти на вході, керуюча дія і масова витрата нафти, а вихідними температура нафти на виході і температура димових газів, а також передавальні функції. Горбійчук М.І. рекомендував необхідні рівняння для висвітлення. Когутяк М.І. надав рекомендації для висвітлення структурних схем непрямого нагрівача.

[12] М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук та М. І. Когутяк, "Система автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику," у Proc. 16th Int. Scientific and Practical Internet Conf. «Modern Movement of Science», Dnipro, Oct. 14–15, 2024, pp. 140–142. <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2024/10/Conference-Proceedings-October-14-15-2024-1.pdf>. Здобувач презентував синтез каскадно-зв'язаної системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти. Горбійчук М.І. дав рекомендації для визначення завдання дослідження. Когутяк М.І. надав оцінку перехідних характеристик нагрівача.

[13] M. Horbiichuk and M. Vasylenchuk, "Structural and parametric synthesis of an automatic control system for a line oil heater," in *Abstracts of XXXI Int. Scientific and Practical Conf.*, Munich, Germany, Aug. 4–6, 2025, pp. 88–89. <https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2025/06/SCIENTIFIC-TRENDS-IN-THE->

DEVELOPMENT-OF-MODERN-EDUCATION.pdf. Здобувач презентував систему автоматичного керування, регулятори якої реалізовані за допомогою комбінованого методу s -площини і узагальненого квадратичного критерію. Horbiichuk M. надав рекомендації щодо висвітлення процесу регулювання в випадку збурень для розробленої схеми шляхового нагрівача.

[14] M. I. Horbiichuk, M. Z. Vasylenchuk and M. I. Kohutiak, "Analytical studies on the dynamic properties of indirect oil heaters," in *7th Int. Scientific and Practical Internet Conf. «Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Summer Debates»*, Dnipro, Ukraine, Aug. 7–8, 2025, pp. 19–20. <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2025/08/Conference-Proceedings-August-7-8-2025-1.pdf>. Здобувач висвітлив результати редуції передавальних функцій нагрівача. Horbiichuk M. I. проаналізував результати дослідження. Kohutiak M.I. рекомендував висвітлити графіки аналітичного дослідження після редуції передавальних функцій.

[15] М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук та М. І. Когутяк, "Інваріантна система автоматичного керування шляховим нагрівачем нафти," у *Всеукр. інтернет-конф. молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості»*, Івано-Франківськ, 9 жовт. 2025, с. 36–38. <https://drive.google.com/file/d/1sim7SKa62RzaS5XZrTGt248h5VAFfIWQ/view>. Здобувач доповів щодо процесу створення інваріантної системи автоматичного керування, а також про результати її роботи на промисловому контролері. Горбійчук М.І. проконсультував з висвітленням синтезованої структурної схеми інваріантної системи автоматичного керування. Когутяк М.І. надав рекомендації з висвітлення синтезованого коректора і його роботи.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	20
ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ	28
1.1 Функціональне призначення нагрівача з проміжним теплоносієм у системі транспортування нафти і природного газу	28
1.2 Аналіз математичних моделей процесу нагрівання нафти і газу в нагрівачах з водяною банею	34
1.3 Аналіз праць в області автоматичного керування процесом нагріву в нагрівачах з водяною банею	43
1.4 Обґрунтування вибору теми дисертаційного дослідження.....	46
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НЕПРЯМОГО НАГРІВНИКА З ПРОМІЖНИМ ТЕПЛОНОСІЄМ	50
2.1 Функціональне призначення непрямого нагрівача нафти	50
2.2 Непрямий нагрівач нафти як об'єкт автоматичного керування.....	51
2.3 Математична модель непрямого нагрівача нафти.....	55
2.4 Лінеаризована математична модель непрямого нагрівача нафти	66
Висновки до розділу.....	73
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШЛЯХОВОГО НАГРІВАЧА НАФТИ З ПРОМІЖНИМ ТЕПЛОНОСІЄМ	75
3.1 Розрахунок параметрів статичного режиму роботи нагрівача нафти..	75
3.2 Розрахунок параметрів і дослідження динамічних властивостей нагрівача нафти як об'єкта автоматичного керування	81
3.3 Спрощення (редукція) лінеаризованої математичної моделі нагрівача нафти.....	90
Висновки до розділу.....	100
РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	102

НАГРІВНИКОМ НАФТИ З ПРОМІЖНИМ ТЕПЛОНОСІЄМ.....	
4.1 Постановка задачі синтезу системи автоматичного керування	102
4.2 Одноконтурна система автоматичного керування процесом нагрівання нафти.....	110
4.3 Каскадно-зв'язана система автоматичного керування нагрівачем непрямої дії.....	119
4.4 Структурно-параметричний синтез системи автоматичного керування шляховим нагрівником нафти	133
4.5 Інваріантна система автоматичного керування нагрівачем з проміжним теплоносієм	141
Висновки до розділу	157
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	159
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	163
ДОДАТКИ	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CGS - міський газовий шлюз;

PLC – промислові контролери;

САК – система автоматичного керування;

ПТБ – піч трубчаста блокова;

ЛДС – лінійна дискретна система;

РР – різницеve рівняння;

WBH – нагрівачі з водяною банею;

FBD – функціональні блокові діаграми;

LAD – східчаста логіка;

ST – структурний текст;

ПІД-регулятор – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор.

ШНМ - штучні нейронні мережі

АЧХ - амплітудно-частотна характеристика

HVAC - Опалення, вентиляція та кондиціювання повітря

ВСТУП

Актуальність роботи. Нагрівачі з проміжним теплоносієм знайшли широке застосування в нафтогазовій промисловості. Їх використовують для нагріву природного газу з метою запобігання утворення гідратів при пониженні тиску природного газу. Нафту в нагрівачах з проміжним теплоносієм нагрівають для запобігання відкладення парафінів і зменшення в'язкості нафти, що забезпечує економію енергоресурсів на транспортування нафти трубопровідною системою.

Аналіз літературних джерел показав, що зусилля дослідників зосереджені на вирішенні проблем підвищення теплопровідності проміжного теплоносія, підвищенню коефіцієнта корисної дії нагрівача та вдосконаленню існуючих систем автоматизації процесом нагріву робочого тіла (нафти або природного газу). Реалізація перших двох напрямків досліджень вимагає вкладення додаткових інвестицій і внесення певних змін в конструкцію нагрівачів з проміжним теплоносієм.

Дослідження в області удосконалення систем автоматичного керування мають на меті визначити певну критичну температуру природного газу, яка б гарантувала відсутність процесу гідратоутворення. Після досягнення такої температури подача паливного газу до горілки припиняється.

Для вирішення поставлених задач автори використовують статичні моделі, отримані на основі закону збереження кількості енергії.

Оскільки нагрівачі з проміжним теплоносієм мають значну інерційність, то відсутність моделей, які описують динамічні процеси теплопередачі між елементами нагрівника, не дають змоги в повній мірі оцінити ефективність прийнятих рішень. Крім того відсутність математичних моделей нагрівачів з проміжним теплоносієм є значною перешкодою на шляху створення високоефективних систем автоматичного керування процесом нагрівання робочого тіла в нагрівниках з проміжним теплоносієм.

Таки чином, дисертаційна робота, метою якої є створення математичної моделі нагрівача робочого тіла з проміжним теплоносієм як об'єкта автоматичного керування і синтез на цій основі ефективної системи керування є актуальною науково-технічною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами. Вибраний напрямок досліджень щодо створення математичних моделей та синтезу систем автоматичного керування процесом нагрівання нафти в нагрівачі з проміжним теплоносієм є частиною тематичного плану науково-дослідних робіт Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ).

Наукові дослідження виконані у дисертаційній роботі відповідають тематиці науково-дослідної роботи «Автоматизоване керування детермінованими і стохастичними об'єктами», номер державної реєстрації 0123U102619, яка виконується на кафедрі Автоматизацій та комп'ютерно-інтегрованих технологій ІФНТУНГ. Дисертант була безпосереднім виконавцем окремих розділів роботи, які стосувались математичного моделювання та синтезу системи автоматичного керування нагрівачем нафти з проміжним теплоносієм. Результати наукової роботи, отримані в дисертаційній роботі, впроваджені в навчальний процес (додаток Н).

Мета роботи і задачі досліджень. Метою роботи є створення математичної моделі нагрівача нафти з водяною банею як об'єкта автоматичного керування та вивчення його динамічних властивостей і на цій основі синтезувати інноваційну систему автоматичного керування процесом нагріву робочого тіла (нафти).

Досягнення поставленої мети потребує вирішення таких взаємозв'язаних задач:

– аналіз літературних джерел в області новітніх досліджень щодо підвищення ефективності роботи непрямих нагрівачів природного газу і нафти для обґрунтування напрямку наукових досліджень;

- створити математичну модель непрямого нагрівача нафти з водяною банею та синтезувати його структурну схему для виявлення взаємовпливів між вхідними і вихідними величинами;

- на основі розробленої структурної схеми нагрівника синтезувати можливі варіанти систем автоматичного керування процесом нагрівання робочого тіла та дати їх порівняльну оцінку за розробленим критерієм;

- розробити метод налаштування параметрів ПІ-регуляторів за узагальненим квадратичним критерієм та оцінити якісні показники процесу керування синтезованих систем та вибрати оптимальну за критерієм якості керування.

Об’єктом дослідження є теплообмінні процеси між елементами нагрівача нафти з проміжним теплоносієм.

Предметом дослідження є математичні моделі динамічних процесів та системи автоматичного керування температурними режимами процесу нагрівання нафти в нагрівачі з проміжним теплоносієм.

Методи досліджень. В основу виконаних досліджень покладені методи математичного моделювання з метою отримання передавальних функцій за основним каналом, за допоміжним каналом і за каналами передачі збурень; методи синтезу каскадно-зв’язаних, структурно-параметричних та інваріантних систем керування; методи дослідження стійкості систем автоматичного керування; методи дискретизації математичних моделей для реалізації їх на сучасних мікропроцесорних засобах керування; методи редукції математичних моделей компенсатора збурень в інваріантній системі керування; методи імітаційного моделювання для дослідження ефективності роботи системи автоматичного керування роботою нагрівача нафти з проміжним теплоносієм.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у створенні математичних моделей нагрівача нафти з проміжним теплоносієм, придатних для синтезу системи автоматичного керування процесом нагріву нафти у нагрівачі з проміжним теплоносієм; у синтезі інваріантної системи керування з

двоканальним компенсатором збурень за редукованою математичною моделлю, що дає змогу його реалізації на сучасних мікропроцесорних засобах автоматизації.

Загальний науковий результат – створення математичних моделей теплових процесів у нагрівачі нафти з проміжним теплоносієм і синтез на цій основі інваріантної системи автоматичного керування роботою нагрівача нафти з проміжним теплоносієм.

Наукова новизна дисертаційної роботи визначається такими положеннями:

вперше:

- на основі лінеаризованої моделі нагрівача нафти з проміжним теплоносієм синтезована його структурна схема як об'єкта автоматичного керування, що дало змогу виявити як керуючі дії, регульовані величини, так і зовнішні збурення та намітити шляхи компенсації збурень;

- розроблена інваріантна система за двома каналами передачі збурень (температури і витрати нафти на вході в нагрівач), яка має у своєму складі ПІ/ПД - регулятор і двоканальний компенсатор збурень, що дає змогу ліквідувати вплив зовнішніх збурень;

- розроблений комбінований метод налаштування ПІ/ПД-регуляторів, який включає в себе метод s-площини з вибором такого розміщення коренів характеристичного рівняння, щоб система автоматичного керування була б стійкою з наступною мінімізацією узагальненого критерію якості, який залежить лише від дійсної частини одного із комплексно-спряженого кореня, що дало змогу створити ефективні алгоритми розрахунку параметрів налаштування ПІ/ПД-регуляторів, які є складовими частинами інваріантної системи керування нагрівача нафти з проміжним теплоносієм;

знайшов подальший розвиток:

- метод синтезу компенсатора зовнішніх збурень, який ґрунтується на редукції передавальних функцій об'єкта керування за методом Генкеля і за

методом площин, що дало змогу отримати математичну модель компенсатора збурень, придатної для реалізації на засобах мікропроцесорної техніки.

Практичне значення отриманих результатів. Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, мають таке практичне значення:

- розроблене алгоритмічне і програмне забезпечення обчислення параметрів як нелінійної, так і лінеаризованої математичних моделей нагрівача нафти з проміжним теплоносієм; редукції математичних моделей за методом Генкеля і за методом площ; обчислення параметрів налаштування ПІ/ПД-регуляторів за комбінованим методом; обчислення показників якості процесу керування інваріантної системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти в нагрівачі з проміжним теплоносієм; розрахунок параметрів компенсатора збурень;

- створена імітаційна модель інваріантної системи автоматичного керування з ПІ/ПД-регулятором, за допомогою якої досліджена робота інваріантної системи керування при синусоїдальних і гаусівських збуреннях; встановлено що компенсатор забезпечує повну компенсацію зовнішніх збурень;

- окремі розділи дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес при вивченні студентами спеціальності G7 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка таких дисциплін як «Теорія автоматичного керування» та «Автоматизація технологічних процесів та виробництв» (акт впровадження – додаток Н).

Особистий внесок здобувача. Основні результати математичного моделювання та теоретичних досліджень, які є змістом дисертаційної роботи, одержані автором особисто. У наукових працях, виконаних у співавторстві, автору належить:

[1] - Синтезовані передавальні функції нагрівника у термінах «вхід-вихід» у вигляді відношення двох поліномів і показано, що порядки поліномів

чисельника не більше порядків полінома знаменника, що відповідає фізичній сутності процесу нагріву нафти.

[2] - Проведення дослідження і комп'ютерного моделювання, які показали, що для каскадно-зв'язаної системи автоматичного керування в основному контурі доцільно використати ПІ-регулятор, а в допоміжному — ПІ-регулятор. Для зменшення порядку складних передавальних функцій самого об'єкта керування (шляхового нагрівача) використані методи редукції (метод сингулярних чисел Генкеля та метод площ), що дало змогу знизити порядок передавальних функцій з 19 до 6 та 4. За допомогою алгоритмічного і програмного забезпечення, розробленого в середовищі MatLab, розв'язано задачі і отримані параметри налаштування цих регуляторів та визначені показники якості процесу керування: перерегулювання і час регулювання.

[3] – Розробка алгоритмічного і програмне забезпечення обчислення параметрів нелінійної і лінеаризованої моделей нагрівача нафти з проміжним теплоносієм та редукція передавальних функцій нагрівника нафти з проміжним теплоносієм.

[4] – Створення лінеаризованої математична модель нагрівника нафти з проміжним теплоносієм, знайдені передавальні функції та синтезована структурна схема нагрівача. Встановлені керуючі дії, вихідні величини і зовнішні збурення.

[5] – Створення методу визначення оптимальних параметрів ПІ/ПД-регулятора за узагальненим квадратичним критерієм. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення та обчислені оптимальні параметри налаштування ПІ/ПД-регуляторів як складових елементів і систем автоматичного керування.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались і отримали позитивну оцінку на:

– Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості». Івано-Франківськ, (2023, 2024, 2025)

- X міжнародна науково-практична конференція. Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки та освіти м. Львів. 9-10 січня 2024 року.
- Modern Movement of Science: Proceedings of the 16th International Scientific and Practical Internet Conference, Dnipro. October 14-15, 2024.
- Abstracts of XXXI International Scientific and Practical Conference. Munich, Germany. August 04-06, 2025.
- 7th International Scientific and Practical Internet Conference “Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Summer Debates”. Dnipro, Ukraine. August 7-8, 2025.

Публікації. Основні результати роботи викладені в 15 публікаціях, у тому числі у 8 статтях; шість з них входять до фахових видань категорії Б, а дві статті ([4], [6]) опубліковані у журналах, що індексуються у наукометричній базі «Scopus». За матеріалами дисертації доповідались на 7 наукових конференціях і опубліковані у вигляді тез доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг друкованого тексту становить 207 сторінок, з них: 170 сторінок основного тексту, 50 рисунків і 12 таблиць, список використаних джерел містить 68 найменування на 9 сторінках, 11 додатків на 36 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1.1. Функціональне призначення нагрівача з проміжним теплоносієм у системі транспортування нафти і природного газу

Нагрівачі з поміжним теплоносієм (WBH – нагрівачі з водяною банею) широко застосовують при видобуванні і транспортуванні нафти і газу.

Сфера їх використання [1], [2] – морські платформи, нафтопереробні заводи, міські шлюзи природного газу.

При видобуванні парафінистої нафти її нагрівають в нагрівачах з проміжним теплоносієм з метою запобігання відкладення парафіну на стінках трубопроводів, а також нафту підігрівають для зменшення її в'язкості з метою зменшення енерговитрат на транспортування нафти..

На рис. 1.1 зображена [1] схема транспортування природного газу. При подачі газу споживачам його тиск зменшується.

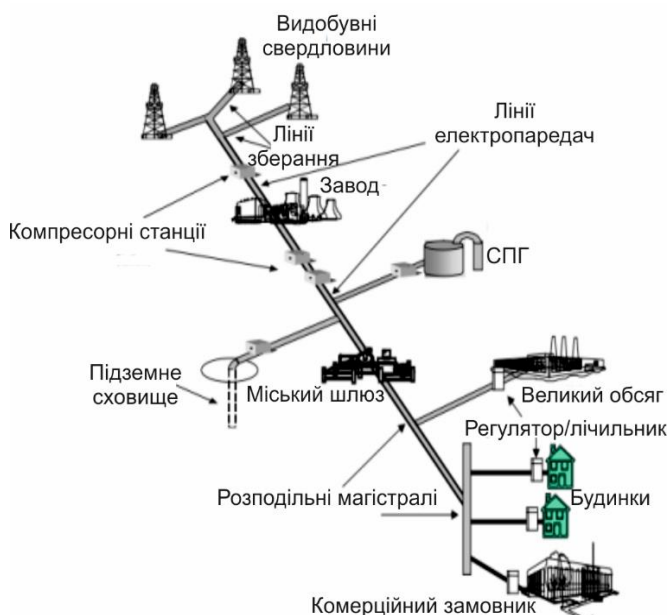


Рисунок 1.1 – Схема транспортування природного газу [1]

У відповідності з ефектом Джоуля-Томсона зниження тиску газу тягне за собою зменшення його температури, що може стати причиною утворення гідратів.

Нагрівачі з водяною банею встановлюється перед редуктором пониження тиску для підвищення температури природного газу та запобігання гідратуутворення.

Нагрівачі з водяною банею, які використовують для нагрівання природного газу і нафти, мають подібні конструкції.

На рис. 1.2 зображений [3] нагрівач нафти з водяною банею. Через занурені у водяну баню пучок труб (змійовик) протікає робоче тіло (нафта або природний газ), тепло до якого опосередковано передається від жарової труби. По жаровій трубі рухаються димові гази, які утворились внаслідок згоряння природного або попутного газу.

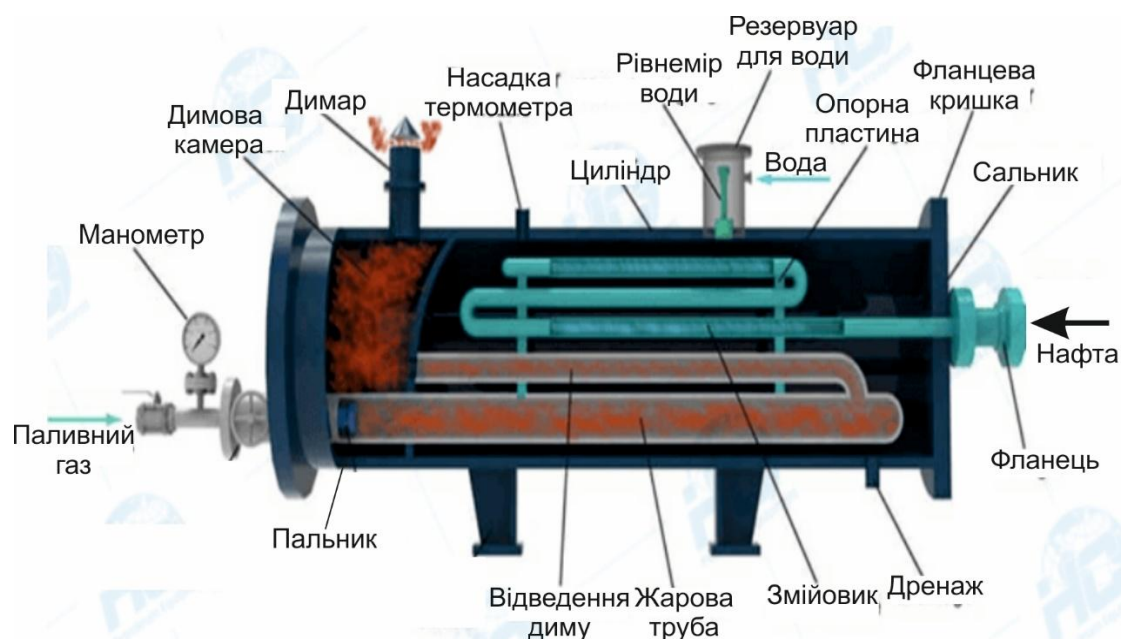


Рисунок 1.2 – Нагрівач нафти з водяною банею [3]

Температуру робочого тіла в змійовику підтримують в межах 54 - 65 ° С. Вищу температуру робочого тіла можна отримати [3], якщо баню заповнити олією або розплавленою сіллю.

Нагрівання сирової нафти, крім запобігання утворення парафінових відкладень, зменшує її в'язкість, що приводить до економії енергетичних затрат на транспортування нафти.

Слід відмітити, що тепло для нагрівання природного газу отримують шляхом спалювання комерційного газу, а в нагрівачах нафти використовують попутний газ, що має значно меншу комерційну вартість.

Тому у цілому ряді робіт [4 – 7], у яких аналізуються різні аспекти роботи нагрівників, розглядаються питання пошуку шляхів економії паливного (комерційного) газу та зменшення шкідливих викидів в атмосферу.

У непрямому нагрівачі проміжний теплоносіє (вода) має значний об'єм тому зміна температури рідини для ванни вимагає тривалого часу [8].

Швидкість, з якою може підвищуватися температура, обмежується швидкістю запалювання пальника (рис. 1.2). Коли пальник вимкнено, зниження температури залежить від здатності технологічного змішувача зменшувати температуру води у ванні. У будь-якому випадку для суттєвої зміни температури ванни може знадобитися від 30 хвилин до кількох годин [8].

Реакція системи на зміну температури димових газів залежить від коефіцієнта теплопередачі води.

Автори роботи [4] досліджували вплив багатошарових вуглецевих нанотрубок на процес передачі тепла в експериментальній установці. До рідини на основі етиленгліколю і води додавали нанотрубки діаметром 20 – 30 нм, у таких об'ємних концентраціях: 0,025; 0,05; 0,1; 0,2 і 0,3 .

Результати досліджень, отримані авторами, показали, що із збільшення концентрації наночастинок у рідині її в'язкість збільшується. Збільшення температури нанорідини зменшує її в'язкість і щільність. Коефіцієнт питомої теплоємності нанорідини збільшується із зростанням температури, але не показує істотних змін зі збільшенням об'ємної частки нанотрубок у рідині. За результатами досліджень автори роботи [4] прийшли до висновку, що ефективність експериментальної установки зросла на 48 % при об'ємній частці 0,5 і температурі 70 °C.

Позитивний вплив на теплопровідність рідини на основі етиленгліколю, до якої додані наночастинки ZnO з різними масовими частками від 1,75 % до 10,5 %, підтвердили автори роботи [9]. Експериментальні дослідження показали збільшення теплопровідності рідини при зміні температури від 15 °C до 55 °C. Теплопровідність помітно зростає при збільшенні концентрації наночастинок у межах досліджуваного діапазону температур.

Інші дослідники [7] вивчали вплив ультразвукових коливань на теплопровідність рідини в тепловій батареї. Запропонований авторами інноваційний активний метод, заснований на технології ультразвукової обробки, для покращення теплопередачі в теплових батареях. Для проведення експериментів використовується лабораторний нагрівач. Результати були успішно перевірені за допомогою емпіричного співвідношення. Щоб оцінити вплив ультразвукових коливань, всі випробування проводилися в двох режимах, а саме без вібрації та з вібрацією на різних рівнях потужності ультразвуку. Результати показують, що позитивний тепловий вплив ультразвукової вібрації на збільшення швидкості теплопередачі більш очевидний при менших витратах рідини та нижчих рівнях потужності нагрівача. У поточних експериментах максимальне значення збільшення теплопередачі було оцінено на 166% при швидкості потоку рідини 0.5 л/хв і потужності нагрівача 200 Вт. Результати цього дослідження можуть призвести до значної економії електроенергії.

Інший напрямок досліджень, який висвітлений в публікаціях [5], [10], [11] присвячений проблемі підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) нагрівача.

У роботі [10] міський газовий шлюз (CGS) був розглянутий як приклад. Розраховані тепловтрати та ККД обігрівача, встановленого на цій станції. ККД обігрівача становив близько 52%, що є неприпустимим. Тому була запропонована сонячна система, яка б забезпечувала частину потреби в теплі. Пропонована система включає в себе масив сонячних колекторів з накопичувальним баком. Система здатна заощадити понад 39000 м³ природного газу за рік. Було досліджено використання тепловтрат від димових газів для попереднього підігріву повітря, необхідного для горіння. Результати досліджень

показали, що нагрівання повітря для горіння зменшують споживання палива та підвищують ККД нагрівача.

Автори роботи [10] провели дослідження процесу згоряння паливного газу в топці нагрівачів з водяною банею. Вплив різних параметрів на ефективність згоряння палива був досліджений шляхом встановлення засобів моніторингу та аналізу продуктів. Чотири датчики температури були встановлені на вході та виході газу, всередині водяної бані та в навколишньому середовищі, щоб забезпечити безперервний моніторинг змін температури нагрівачів щодо навколишнього середовища. Всі датчики були підключені до монітора. На лінії паливного газу був встановлений лічильник для оцінки обсягу використання палива. Ефективність роботи нагрівача оцінювалась на різних потужностях. Крім того здійснювався моніторинг і фіксація параметрів продуктів згоряння. Для зменшення надлишку повітря, а також для підвищення ефективності згоряння, було відрегульовано вхідне повітря пальника. Після знаходження ефективної потужності печі, зміни температури печі вимірювали в різних діапазонах і з урахуванням зміни температури навколишнього середовища розраховували потужність. За допомогою ЕОМ був розрахований ККД печі і витрати палива. Для того, щоб підтримувати продукти згоряння в камері протягом більш тривалого періоду часу, до пальника була прикріплена барометрична заслінка.

З огляду на результати, отримані в результаті безперервного моніторингу встановлено, що основною проблемою цих нагрівачів була невідповідність теплоємності пальників з необхідним тепловим навантаженням нагрівачів. Вироблене тепло виводиться з димовими газами без передачі тепла воді всередині нагрівача. Це збільшує витрати паливного газу, а отже, знижує загальну ефективність системи нагрівання.

Для підвищення ККД котлів і зниження споживання ними газу, пальники повинні бути відрегульовані в оптимальному відношенні до кількості паливного газу і повітря. Для цього спочатку зі збільшенням кількості газу за допомогою регуляторів потужність пальника збільшують для зменшення кількості зайвого

повітря (CO газу не повинна перевищувати від 300 ppm) і підвищують до різкого стрибка температури газу, що виходить з топки. Нарешті, кількість зайвого повітря зменшується за рахунок зменшення вхідного повітря в пальник. Вхідне повітря пальника зменшується до того моменту, поки полум'я не стане стабільним, а кількість газу $\text{CO} < 300 \text{ ppm}$.

За рахунок регулювання довжини полум'я пальника, контролю співвідношення повітря / паливо і установки барометричної заслінки, отримали збільшення ефективності згоряння на 10% і збільшення загального ККД підігрівачів на 30%.

У роботі [11] для експериментально досліджень була виготовлена установка нагрівача та розрахований її тепловий ККД. Термосифонна тепла труба була розроблена, виготовлена та використана між вогнепальною та газовою трубами. Далі було вибраний тип робочої рідини та діапазон коефіцієнта заповнення та запропоновано найбільш ефективний стан. Крім того, досліджено теплову ефективність нагрівача за наявності термосифонної теплової труби. Отримані результати показали, що тепловий ККД нагрівача підвищився до 13% з додаванням термосифонної теплової труби. Найефективніший стан термосифонної теплової труби був пов'язаний з водою як робочою рідиною з 20% коефіцієнтом наповнення в передньому тракті та метанолом як робочою рідиною з 30% коефіцієнтом наповнення в задньому тракті жарової труби.

Однією із важливих проблем, яка виникає при експлуатації нагрівачів нафти і газу з водяною банею, є заміна води в нагрівачі.

Нагрівачі нафти і газу вимагають очищеної води, але рівень дистильованої води всередині нагрівача з часом поступово знижується. Наповнювати нагрівач свіжою водою дорого і шкідливо для навколишнього середовища. Тому використання прісної води, що виробляється установкою для опріснення (HDH), є перспективним рішенням для вирішення проблеми заміни води і забезпечення ефективної роботи нагрівачів нафти і природного газу [12].

У нагрівачах природного газу та нафти значна частина енергії, що генерується в жаровій трубі, втрачається в навколишнє середовище через вихлопну трубу, знижуючи їх ККД. У роботі [13] розраховували швидкість розсіювання тепла і теплову ефективність нагрівача. Їх результати показали, що більше 38% енергії витрачається з димовими газами, які можуть бути використані для виробництва дистильованої води, необхідної для нагрівачів.

У цьому дослідженні [13] також оцінювався вплив інтеграції теплових труб і рекуперації відпрацьованого тепла на виробництво прісної води за допомогою системи опріснення HDH [14]. Були розглянуті два важливі аспекти: використання семи термосифонних трубок (ТНР) у димоході для уловлювання відпрацьованого тепла та включення зон конденсації в ТНР, підключених до колектора.

Таким чином, значна увага дослідників у напрямку покращення ефективності роботи нагрівачів природного газу і нафти направлена на підвищенні теплопровідності проміжного теплоносія, збільшенні ККД нагрівача та отриманні дистильованої води для поповнення і заміни проміжного теплоносія.

Вирішення вказаних проблем ґрунтується на використанні методів моделювання з залученням комп'ютерних технологій та розробці ефективних систем керування процесом нагрівання нафти і природного газу в нагрівачах з проміжним теплоносієм.

1.2. Аналіз математичних моделей процесу нагрівання нафти і газу в нагрівачах з водяною банею

Більшість робіт, які присвячені математичному моделюванню теплових процесів, висвітлюють питання пов'язані з визначенням технологічних і конструктивних характеристик нагрівачів з водяною банею.

Так у роботі [5] тепловий процес у нагрівачі розглядається як стаціонарний (параметри, що характеризують процес нагріву не змінюються з

плином часу) при незмінному тиску в трубопроводі. Природний газ з відомим хімічним складом вважається ідеальним.

За таких допущень математична модель використана для визначення ККД нагрівача. В основу розрахунку ККД нагрівача природного газу з водяною банею покладено рівняння теплового балансу [16]:

$$Q_{fuel} = Q_{losses} + Q_{NG} + Q_{stored},$$

де Q_{fuel} - тепло, отримане внаслідок згорання паливного газу в топці;

Q_{losses} - незворотні втрати тепла;

Q_{NG} - необхідне тепло для нагрівання природного газу (робочого тіла);

Q_{stored} - енергетичні затрати на нагрівання проміжного теплоносія.

Незворотні втрати тепла Q_{losses} включають в себе дві складові:

$$Q_{losses} = Q_{stack} + Q_{sufr},$$

де Q_{stack} - втрати тепла з димовими газами;

Q_{sufr} - затрати тепла на нагрів стінок корпусу водяної бані.

Теплота, що передається робочому тілу, обчислюють за такою формулою:

$$Q_{NG} = m_{NG} (h_{out} - h_{in}), \quad (1.1)$$

де m_{NG} - масова витрата природного газу;

h_{out} , h_{in} - ентальпія газу на виході із нагрівача і на його вході.

Для спрощення розрахунків, як паливо, був вибраний метан, для якого записано стехіометричне рівняння при присутності повітря [5]. Потім при надлишку повітря в 50% та при коефіцієнті вологості 46% розраховували витрати тепла з димовими газами, яке подібне до (1.1), тобто

$$Q_{stack} = m_{product} (h_{out}^{stact} - h_{in}^{stact}),$$

де $m_{product}$ - масова витрата продуктів згорання;

h_{out}^{stact} , h_{in}^{stact} - ентальпія продуктів згорання на виході і на вході димоходу.

Корпус бані нагрівача утворений трьома шарами: сталь, ізоляційний матеріал із скловати та алюмінієва оболонка (Рис. 1.3).

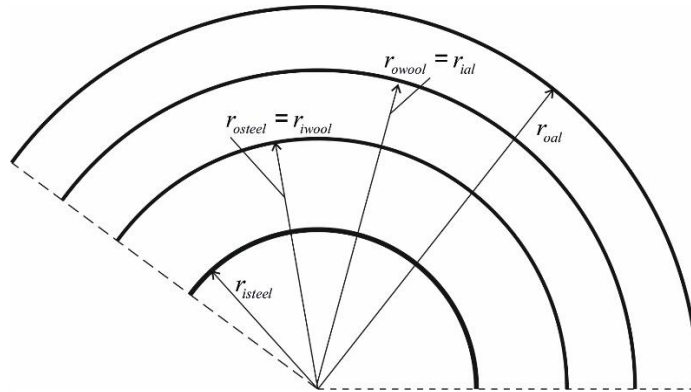


Рисунок 1.3 – Шари корпусу нагрівача з водяною банею

При допущенні, що температура внутрішньої стінки бані нагрівача однакова з температурою проміжного теплоносія розраховували енергетичні втрати на нагрів корпусу водної бані за такою формулою [15]:

$$Q_{surf} = \frac{T_w - T_{am}}{a_{st} \ln\left(\frac{r_{o,steel}}{r_{i,steel}}\right) + a_{wl} \ln\left(\frac{r_{o,wool}}{r_{i,wool}}\right) + a_{al} \ln\left(\frac{r_{o,al}}{r_{i,al}}\right) + \frac{1}{h_{air} A_{heater}}},$$

$$\text{де } a_{st} = \frac{1}{2\pi K_{steel} L_{steel}}; \quad a_{wl} = \frac{1}{2\pi K_{wool} L_{wool}}; \quad a_{al} = \frac{1}{2\pi K_{al} L_{al}};$$

T_w - температура теплоносія;

T_{am} - температура навколишнього середовища;

L – довжина кожного шару;

K – коефіцієнт теплопередачі кожного шару;

h – коефіцієнт теплопередачі повітря;

A – поверхня теплообміну;

r – радіуси шарів (Рис. 1.3) корпусу нагрівача.

Затрати енергії на нагрівання води в [5] обчислені за такою формулою:

$$Q_{stored} = m_w c_{p,w} \Delta T_w,$$

де m_w - маса води (проміжного теплоносія);

$c_{p,w}$ - питома теплоємність;

ΔT_w - зміна температури води за вибраний проміжок часу.

Після визначення всіх складових енергетичного балансу був оцінений ККД нагрівача з водяною банею

ККД нагрівача = [(Вхідна енергія – витрачена енергія) / вхідна енергія].

Аналогічний підхід для визначення ККД нагрівача з водяною банею був використаний і в роботі [6].

У роботі [13] експериментально досліджено ефективність термосифонної (теплової) трубки в нагрівачі з водяною банею.

Теплові трубки [14], [16], [17] визнані однією з найефективніших пасивних технологій передачі тепла. Теплова трубка - це конструкція з дуже високою теплопровідністю, яка дозволяє транспортувати тепло, підтримуючи майже однакову температуру вздовж нагрітих і охолоджених ділянок. Основна частина теплової трубки складається з вакуумної трубки, частково заповненої робочою рідиною, яка існує як в рідкій, так і в паровій фазах. Робоча рідина знаходиться в нижній частині труби. Підведення джерела тепла дозволяє рідині випаровуватися. Різниця в температурі стінки призводить до того, що пара конденсується і вивільняє приховане тепло, дозволяючи рідині повертатися в нижню частину трубки під дією сили тяжіння (термосифони).

Ефективність застосування теплових трубок [13] досліджувалась на експериментальній установці (рис. 1.4), яка вміщувала вісім теплових трубок, розміщених у різних положеннях на жаровій трубі, витратомір паливного газу і десять термопар, розташованих на однакових відстанях одна від одної. Хімічний склад продуктів згорання контролювали газоаналізатором. Усі випробування проводились у незмінних умовах. Метою дослідження було підбір рідини для теплових трубок, яка здатна забезпечити найбільше зростання ККД нагрівача.

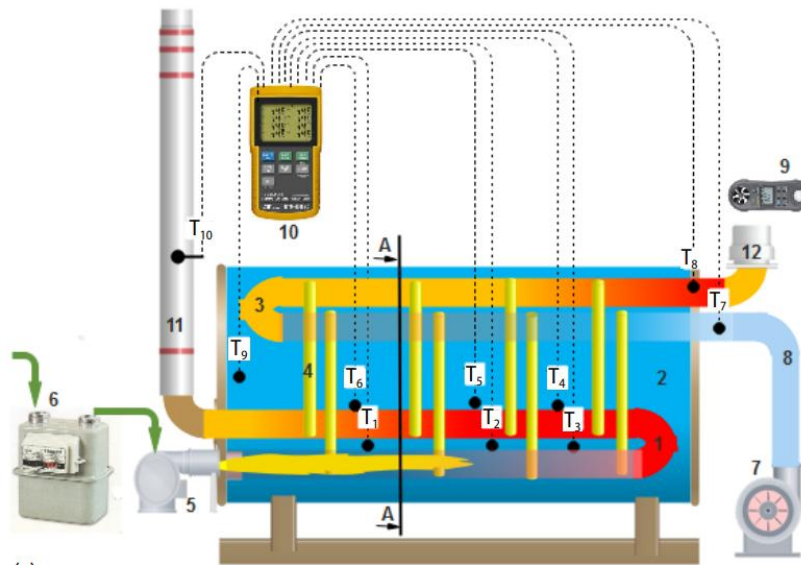


Рисунок 1.4 – Схема експериментальної установки [13]:

1 – жарова труба, 2 – водяна баня, 3 – повітряна труба, 4 – теплові трубки, 5 – пальник, 6 – лічильник палива, 7 – повітродувка, 8 – повітрозабірна труба, 9 – анемометр, 10 – реєстратор температурних даних, 11 – димохід,

Значення теплової ефективності нагрівача обчислювали за такою формулою:

$$\eta = \frac{Q}{m_f l_{hv}} 100\%, \quad (1.2)$$

де m_f - масова витрата паливного газу;

l_{hv} - нижча теплотворна здатність паливного газу.

Кількість переданого тепла від жарової труби і через теплові трубки була такою:

$$Q = m_a C_p (T_{g,2} - T_{g,1}),$$

де m_a - масова витрата повітря;

C_p - питома теплоємність повітря;

$T_{g,1}$, $T_{g,2}$ – температура газу на вході і на виході.

У формулі (1.2) масову витрату паливного газу визначили за формулою:

$$m_f = \frac{PV}{ZRT},$$

де P – тиск газу;

T – температура газу;

R - гасова стала;

Z - коефіцієнт стисливості газу.

У цьому дослідженні [13] для безпеки замість природного газу в газовій трубці використовували повітря. Повітря надходило в газову трубку за допомогою повітрорудки, а анемометр використовували для вимірювання швидкості повітря. Масову витрату повітря визначали за формулою:

$$m_a = \rho v A,$$

де ρ – густина повітря;

v – швидкість повітря;

A - площа поверхні газової трубки.

Результати проведених досліджень дали змогу авторам роботи [13] стверджувати, що при використанні теплових трубок тепловий ККД нагрівача збільшився з 3 до 13%, тобто за рахунок підвищення теплової ефективності методу, запропонованого в даній роботі, і узагальнення його на всі нагрівачі CGS, споживання енергії і, отже, викиди парникових газів будуть скорочені.

Інший напрямок застосування математичних моделей – знаходження функціональних залежностей коефіцієнта теплопровідності та в'язкості від технологічних параметрів нагрівача

У зв'язку з широким застосуванням нанорідин [18], чисельні та експериментальні дослідження були зосереджені на теплофізичних властивостях потоку нанорідин [19] - [21].

Додавання наночастинок до проміжного теплоносія підвищує теплопровідність і змінює в'язкість нанофлюїду. Багато дослідників [22] висунули різні кореляційні моделі для прогнозування в'язкості і теплопровідності нанорідин. Але розроблення адекватних емпіричних моделей

є складною і затратною [22] процедурою через значну нелінійність між задіяними змінними та в'язкістю і теплопровідністю.

Штучні нейронні мережі (ШНМ) можуть бути значно ефективнішим способом прогнозування в'язкості на теплопровідності нанофлюїдів.

У роботі [22] використана модель нейронного багатошарового персептрона для прогнозування в'язкості нанофлюїду на основі етиленгліколю. Для навчання мережі алгоритм зворотного поширення (алгоритм зворотного поширення зворотного зв'язку) [23]. ШНМ навчалась на даних, які становили 20% від загального обсягу даних. Навчання мережі здійснювалось за допомогою оптимізатора Adam. Оптимальні значення параметрів навчання мережі були знайдені методом проб і помилок.

Оцінка ефективності спроектованої мережі оцінювалась шляхом визначення середньої квадратичної похибки (СКП), середнього квадратичного відхилення (СКВ) та коефіцієнта кореляції (КК). За значеннями обчислених величин СКП, СКВ і КК було встановлено [22], що число прихованих шарів мережі дорівнює двом, а число нейронів у прихованих шарах - 45.

Такий підхід можна використати і для прогнозування інших параметрів теплоносіїв, зокрема, для прогнозування коефіцієнта теплопровідності.

Недоліком такого способу прогнозування параметрів теплоносія є те, що розроблена нейромережа має обмежене застосування і її можна використовувати тільки для даних, на яких навчалась мережа.

У роботі [24] за допомогою ШНМ прогнозується теплопровідність нанорідини оксид-вода. Було спроектовано дві моделі штучного інтелекту з трьома і чотирьома входами. Перша модель, з трьома входами, враховує вплив температури, об'ємної частки і теплопровідності наночастинок, а друга модель додатково враховувала вплив на теплопровідність середнього розміру наночастинок. ШНМ була навчена на множині даних, отриманих авторами роботи [24], так і на даних запозичених у інших авторів. Обидві моделі показали задовільну збіжність при прогнозуванні експериментальних даних.

Дещо кращі результати отримані при прогнозуванні коефіцієнта теплопровідності за моделлю з чотирма входами.

Для оцінки ступені впливу вуглецевих нанотрубок на коефіцієнт теплопровідності в роботі [25] використана штучна нейронна мережа.

Ступінь впливу нанотрубок на коефіцієнт теплопровідності досліджувалась на таких рідинах як дистильована вода і етиленгліколь.

Прогнозування коефіцієнту теплопровідності за допомогою ШНМ здійснювалось з метою зменшення обсягу експериментальних досліджень. Для збільшення обсягу даних для навчання ШНМ, експериментальні дані доповнювались згенерованими віртуальними точками. Отримані в такий спосіб дані були використані для побудови ШНМ-моделі.

Отримані результати прогнозування коефіцієнта теплопровідності порівнювались з іншими моделями і таке порівняння показало задовільну збіжність.

У дослідження [26] використана ШНМ типу MLP для прогнозування коефіцієнта теплопровідності в залежності від температури нанорідини та об'ємної частки наночастинок з середнім діаметром 10 нм.

Наночастинки $Mg(OH)_2$ були диспергуванні в етиленгліколь. Коефіцієнт теплопровідності визначали за допомогою термоаналізатора. На основі отриманих експериментальних даних при різних концентраціях наночастинок і температури з використанням ШНМ отримана кореляційна залежність.

Спроектвана мережа, яка вміщувала два прихованих шари і п'ять нейронів у кожному шарі, мала найменшу похибку апроксимації експериментальних даних.

Одним з методів підвищення теплових характеристик теплоносіїв є додавання нанорозмірних твердих частинок, добре диспергованих в теплоносіях. Оскільки теплопровідність більшості твердих речовин значно більша, ніж теплопровідності рідин, очікується, що додавання наночастинок до теплоносіїв значно покращить їх теплові характеристики. Рідини, що містять

добре дисперсні та стабільні суспензії наночастинок, називають нанорідинами [26].

Експериментальні дослідження дали змогу встановити, що на теплопровідність нанорідин впливають характеристики наночастинок (навантаження, хімічний склад, фізичні властивості, розмір, форма, ступінь кластеризації), властивості базової рідини та умов експлуатації (температура, рН). Більшість досліджень показали [26], що теплопровідність нанорідин значно вища, ніж у базової рідини, а значення теплопровідності зростає зі збільшенням концентрації наночастинок. Деякі дослідники повідомляли, що теплопровідність нанорідин лінійно зростає зі збільшенням концентрації наночастинок [27], [28].

Експериментально вимірювали теплопровідність базової рідини та нанорідин з різними навантаженнями на наночастинок при різних температурах [26]. Результати показують, що теплопровідність нанорідин вища, ніж у базової рідини, а збільшення теплопровідності змінюється експоненціально залежно від концентрації наночастинок. Крім збільшення концентрації наночастинок, теплопровідність нанорідин зростає зі збільшенням температури. Були запропоновані нейромережеві моделі для представлення теплопровідності як функції температури, концентрації наночастинок і теплопровідності наночастинок. Ці моделі добре узгоджувалися з експериментальними даними.

Таким чином, основні зусилля дослідників зосередженні на покращенні теплофізичних характеристик нагрівачів з водяною банею.

Для оцінки ефективності прийнятих рішень використовувались методи математичного моделювання, як аналітичні, так і експериментальні.

На основі закону збереження кількості енергії у роботах [5], [13] оцінені ефективності роботи нагрівачів шляхом обчислення їх коефіцієнтів корисної дії.

Нагрівачі природного газу і нафти з непрямим нагрівом мають порівняно невисокий ККД через значний об'єм проміжного теплоносія. Одним із шляхів підвищення ККД нагрівача застосування нанорідин, які отримують додавання наночастинок різного типу до теплоносія, що підвищує теплопровідність

проміжного теплоносія, змінюючи в той же час в'язкість нанорідини. Збільшення в'язкості нанорідини може бути негативним явищем.

На сьогодні не існує задовільної теорії, на основі якої можна отримати аналітичні залежності між коефіцієнтом теплопровідності і в'язкістю нанорідини в залежності від таких параметрів як температура, хімічний склад наночастинок, їх розмір та концентрація. Такі залежності отримують шляхом проведення затратних експериментів. Для зменшення обсягу експериментальних досліджень на основі отриманого експериментального матеріалу прогнозують їх властивості (коефіцієнт теплопровідності і в'язкість) за допомогою штучних нейронних мереж.

Такий метод прогнозування властивостей нанорідин має обмежене застосування, оскільки достовірні результати будуть мати місце лише для вибірки даних, на яких навчена мережа.

1.3. Аналіз праць в області автоматичного керування процесом нагріву в нагрівачах з водяною банею

Більшість, проаналізованих робіт [10], [29] – [34], присвячені розв'язанню оптимізаційних технологічних задач таких як модифікація традиційних нагрівачів нафти і газу з використанням попереднього нагріву повітря, яке подається в топку, використання сонячної енергії для попереднього підігріву природного газу перед подачею його в нагрівач з водяною банею.

Для вирішення поставлених задач, які стосуються підвищення ефективності нагрівачів, в [29] розроблена емпірична модель для розрахунку температури природного газу на вході в нагрівач як функція температури навколишнього середовища, коли трубопровід виходить із землі.

У [30] автори розробили сонячні нагрівачі, які попередньо нагрівають природний газ. У роботі [31] оптимізували ефективність згорання палива в топці нагрівача за рахунок використання барометричної заслінки і регулювання

довжини полум'я пальника, що дало змогу знизити витрати палива і, як наслідок, підвищити ККД нагрівника з водяною банею.

Автори роботи [32] запропонували систему виробництва електроенергії та водню шляхом рекуперації тепла димових газів. У ряді робіт [33], [34] використані методи оптимізації, зокрема, методи генетичних алгоритмів та багатокритеріальної оптимізації для розв'язання задач оптимізації виробництва електроенергії на міських станціях підготовки природного газу.

Для використання енергії стисненого газу, який під високим тиском поступає з газотранспортної системи у роботі [35] дросельний клапан замінили турбогенераторною установкою виробництва електроенергії.

Отже, більшість досліджень, виконаних авторами проаналізованих робіт, присвячена розробленню конструктивних змін при побудові нових або при реконструкції існуючих нагрівачів природного газу або нафти. Такі зміни є дорогими і вимагають значних початкових інвестицій.

Щорічно нагрівачі природного газу і нафти викидають у навколишнє середовище велику кількість парникових газів і забруднюючих речовин. Крім того, в звичайних системах, які, для запобігання відкладень гідратів або парафіну, встановлюють певну температуру без врахування температури навколишнього середовища [34].

Щоб усунути такий недолік у роботі [34] була запропонована комп'ютерна система керування, за допомогою якої газ перед подачею в нагрівач попередньо нагрівається до заданої температури. Запропонована система, за твердженням авторів, забезпечує значну економію палива та зменшує викиди шкідливих речовин.

Для регулювання температури природного газу перед його дроселюванням використовують [34] механічну систему (mechanical system), яка визначає температуру природного газу на вході в нагрівач. У той момент, коли температура газу досягає певного значення подача паливного газу припиняється.

Недоліком такої системи є те, що в ній не врахований тиск, під яким газ поступає в нагрівач. Крім того температура газу буде залежати від пори року і погодних умов.

Для усунення цих недоліків у роботі [34] запропонована комп'ютерна система автоматичного керування, яку можна інтегрувати в існуючу механічну систему.

У системі [34] передбачено визначати мінімальну температуру гідрації за такою формулою [36]:

$$T_{gas} = 9,83 + 3,24P_{gas}, \quad (1.5)$$

де P_{gas} - тиск на вході в нагрівач;

T_{gas} - температура, до якої потрібно нагріти газ, щоб уникнути його замерзання у редукційному клапані.

Температура і тиск газу на вході в нагрівач вимірюються датчиками тиску і температури (Рис. 1.5).

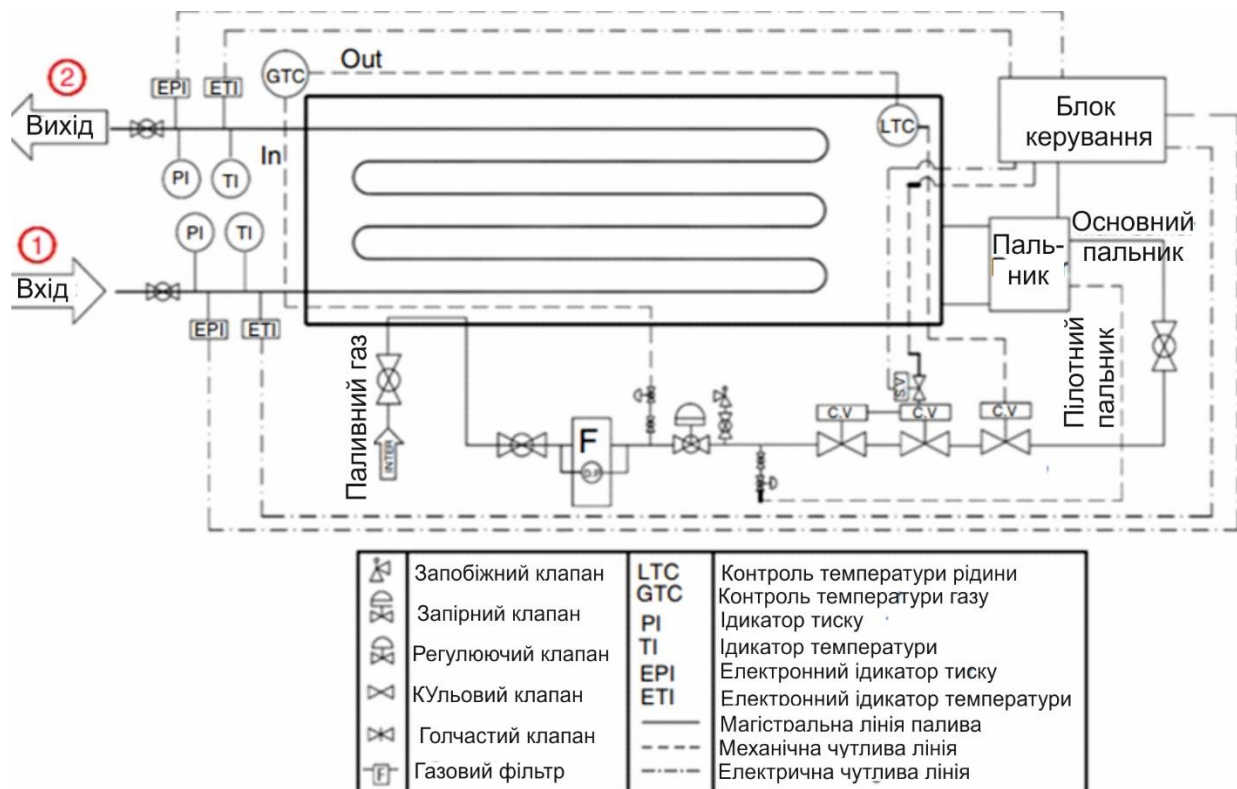


Рисунок 1.5 – Функціональна схема системи керування для паливної магістралі нагрівача [34]

Датчики тиску, які встановлені на вході і виході нагрівача реагують на зміни тиску і необхідна температура розраховується за емпіричною залежністю (1.5). Після досягнення необхідної температури T_{gas} поступає команда на відключення подачі паливного газу.

Аналіз запропонованої системи керування в роботі [34] показує, що така система є нелінійною, оскільки при зміні тиску газу змінюється значення уставки T_{gas} і відбувається режим включення-виключення газового пальника. З огляду на високу інерційність нагрівача з водяною банею як об'єкта автоматичного керування, у системі можливий автоколивальний режим, що може призвести до зниження температури газу нижче допустимого значення і, як наслідок, виникає ймовірність гідратуутворення. Крім того робота пальника у режимі включено-виключено негативно впливає на тепловий стан обладнання.

Оскільки автори роботи [34] розглядають тільки стаціонарний режим роботи нагрівача, то без опису його динамічних властивостей неможливо оцінити всі аспекти його роботи і визначити ефективність системи без врахування динаміки нагрівача природного газу.

1.4. Обґрунтування вибору теми дисертаційного дослідження

Непрямі нагрівачі нафти і природного газу знайшли своє застосування у ряді технологічних операцій. Нагрів нафти в непрямих нагрівачах запобігає відкладенню парафіну в трубопроводах, одночасно зменшуючи в'язкість нафти, що знижує споживання електроенергії при її транспортуванні. Газ, видобутий із свердловини, перед подачею його споживачам редукується до нижчого тиску. Пониження тиску природного газу внаслідок ефекту Джонсона-Томсона спричиняє зниження температури газу, що може спричинити замерзання редуційного клапану і утворення гідратів. Для запобігання негативних явищ, які спричинені редукцією газу його попередньо нагрівають в нагрівачах з водяною банею.

На відміну від нагрівання труб, по яким протікає робоче тіло, безпосередньо полум'ям або піччю, механізм теплопередачі в непрямих нагрівачах, відбувається опосередковано через теплоносій, який заповнена ванна нагрівача, що запобігає появі гарячих ділянок.

Гарячі ділянки, які виникають при прямому нагріві, сприяють накопиченню відкладень зі сторони робочого тіла (нафти або газу), що може бути причиною деградації робочого тіла і стати причиною технологічних аварій.

Оскільки коефіцієнт корисної дії непрямих нагрівачів уступає у цьому відношенні прямим нагрівачам, то основні зусилля дослідників направлені на підвищення ефективності роботи непрямих нагрівачів.

Дослідження проводились в таких напрямках: підвищення коефіцієнта теплопередачі; пошук шляхів підвищення ККД непрямих нагрівачів і вдосконалення системи керування процесом нагріву.

Дослідження у напрямку підвищення коефіцієнта теплопередачі здійснювались шляхом вивчення впливу наночастинок, які у певній пропорції добавляли до проміжного теплоносія, а також вивчали вплив ультразвуку на теплопровідність рідини.

Другий напрямок досліджень – пошук способів підвищення ККД нагрівача. Основні зусилля дослідників направлені на виявлення впливу привнесених конструктивних змін таких як регулювання довжини полум'я горілки, застосування теплових трубок, використання тепла димових газів для підігріву повітря для спалювання газу, використання сонячної енергії для додаткового нагріву теплоносія.

Реалізація першого і другого напрямків досліджень потребує певних конструктивних змін, які вимагають додаткових фінансових ресурсів.

Третій напрямок досліджень передбачає створення систем автоматичного керування шляховими нагрівачами нафти і води. Основна увага дослідників зосереджена на створення систем, які визначають критичну температуру природного газу в залежності від вхідного тиску і яка запобігає утворенню

гідратів. При досягненні такої температури подача паливного газу до пальника припиняється.

Для аналізу ефективності прийнятих рішень автори досліджень використовують статичні математичні моделі, в основі яких лежить закон збереження кількості енергії. Не врахування динамічних властивостей нагрівників з водяною банею, як об'єктів автоматичного керування, не дає можливості у повній мірі оцінити роботу нагрівачів у перехідних режимах і обґрунтовано вибрати параметри систем керування.

Тому тема дисертаційної роботи, яка направлена на створення математичних моделей непрямого нагрівника нафти, як об'єкта керування і на цій основі здійснити синтез ефективної системи керування непрямыми нагрівачами нафти є актуальною.

Метою роботи є створення математичної моделі нагрівача нафти з водяною банею та на цій основі вивчених динамічних властивостей нагрівача і на цій основі синтезувати інноваційні системи автоматичного керування процесом нагріву робочого тіла (нафти).

Досягнення поставленої мети потребує вирішення таких взаємозв'язаних задач:

- аналіз літературних джерел в області аналізу новітніх досліджень щодо підвищення ефективності роботи непрямих нагрівачів природного газу і нафти для обґрунтування напрямку наукових досліджень;

- створити математичну модель непрямого нагрівача нафти з водяною банею та створити його структурну схему для виявлення взаємовпливів між вхідними і вихідними величинами;

- на основі розробленої структурної схеми нагрівника синтезувати можливі варіанти систем автоматичного керування процесом нагрівання робочого тіла та дати їх порівняльну оцінку за розробленим критерієм;

- розробити метод налаштування параметрів ПІ-регуляторів за узагальненим квадратичним критерієм та оцінити якісні показники процесу

керування синтезованих систем та вибрати оптимальну за критерієм якості керування.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НЕПРЯМОГО НАГРІВНИКА З ПРОМІЖНИМ ТЕПЛОНОСІЄМ

2.1. Функціональне призначення непрямого нагрівача нафти

Нагрівачі непрямого типу з водяною ванною широко застосовуються в нафтовій і газовій промисловості для підігріву робочих середовищ (нафти або газу, видобутих із свердловини). Теплопередача в таких пристроях відбувається опосередковано через ванну (ємність), на відміну від прямого нагрівання полум'ям або піччю. Використання ванни забезпечує рівномірний нагрів і знижує ризик утворення гарячих зон. Такі зони часто виникають у нагрівачах із прямим підігрівом димовими газами через накопичення відкладень на стороні робочої рідини. Якщо це не контролювати, накопичення може призвести до деградації металу, що, в свою чергу, може викликати розриви, вибухи або витіки. Завдяки непрямому принципу дії нагрівачів ризик виникнення небезпечних ситуацій значно нижчий (горючі потоки ізольовані), у порівнянні з нагрівачами з прямим підігрівом. Тому такі нагрівачі можна використовувати в зонах підвищеної небезпеки, де питання безпеки є пріоритетними.

При зборі високопарафіністих, в'язких нафт, а також нафт, які мають високу температуру застигання, з метою забезпечення текучості нафти, необхідно підігрівати продукцію свердловин, яка поступає від гирла свердловин до центрального пункту збору і підготовки нафти і газу. Для підігрівання продукції свердловин у викидних лініях використовують гирлові нагрівачі УН-0,2 і ПТТ-2, а для підігрівання продукції свердловин в нафтозбірних колекторах – шляхові нагрівачі ПП-0,4; ПП-0,63; ПП-1,6 і трубопровідні нагрівачі типу ПТ.

2.2. Непрямий нагрівач нафти як об'єкт автоматичного керування

Розглянемо принципову схему і функціональні особливості підігрівання нафти на прикладі найбільш поширених їх типів. Автоматизовані блокові газові печі з водяним теплоносієм ПП0,63; ПП-1,6, ПП-4 призначені для підігрівання зневоднених нафт, нафтових емульсій і води, для різних технологічних потреб.

Складається підігрівач з наступних основних частин: - блок нагріву (призначений для передачі тепла від продуктів згорання продукту, який нагрівається); - блок підготовки палива (БПП); - система автоматики і безпеки. Нафта з промислової мережі через засувку поступає в продуктивний змішувач підігрівача (блок нагріву), нагрівається від проміжного теплоносія (вода) після чого виводиться з підігрівача. Паливо спалюється в топці підігрівача, віддаючи тепло проміжному теплоносію

Підігрівач шляховий ПП-1,6 випускається в двох виконаннях, що відрізняються по вигляду використовуваного палива: ПП-1,6А (газовий) як паливо використовує природний або попутний нафтовий газ; ПП-1,6АЖ (рідинний) використовує нафту з паливної системи або з промислової мережі, яка піддається попередньому очищенню і редукуванню при допомозі блоку підготовки рідкого палива БПРП. Для забезпечення безпечних умов роботи підігрівач ПП-1,6 оснащується системою контролю і автоматики, яка дозволяє проводити дистанційний підпал форсунок, регулює параметри процесу нагріву нафти, здійснює функції робочої і аварійної сигналізації і автоматичного захисту при відхиленні технологічних параметрів Шляховий підігрівач схематично показаний на рис. 2.1.

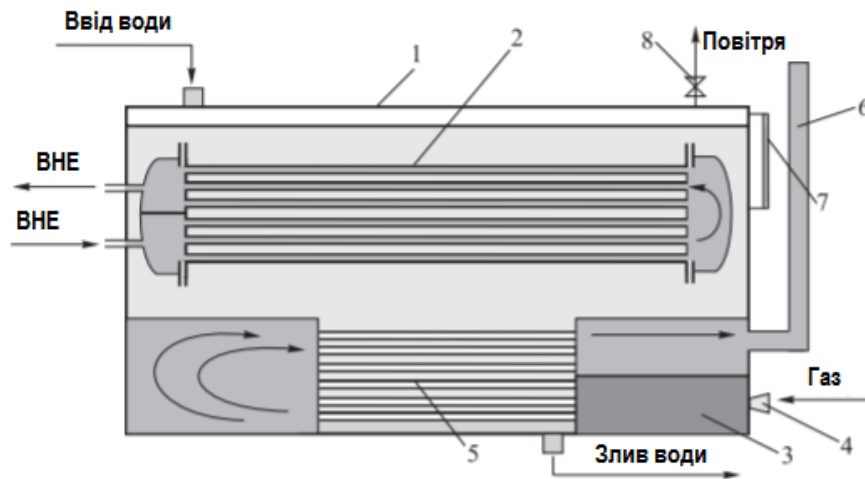


Рисунок 2.1 – Шляховий підігрівач ПП: 1 — корпус; 2 — теплообмінні труби; 3 — камера згорання газу; 4 — форсунка газу; 5 — жарові труби; 6 — димохід; 7 — показчик рівня води; 8 — кран для скидання газу.

Шляховий підігрівач (рис. 2.2) — це апарат прямокутної або циліндричної форми. У його корпусі 1 розташовані теплообмінні труби 2, по яким протікає нафта, що нагрівається, або інша рідина. У нижній частині корпусу 1 розміщені форсунки газу 3, камера згорання паливного газу і жарові труби 5. До корпусу 1 примикає вихлопна труба 6, показчик рівня води 7 і патрубок з краном 8 для скидання газу, що виділився з води, в атмосферу. Принцип роботи шляхового підігрівача полягає в наступному. Міжтрубний простір труб 2 і жарові труби 5 занурені у воду, а нафта, що нагрівається, подається на потоку через труби 2.

Тепло згорання паливного газу, що поступає в камеру 3 через форсунку 4, передається через жарові труби 5 воді, що знаходиться в їх міжтрубному просторі. Від нагрітої води тепло в подальшому передається трубам 2 і далі через їх стінки нафті, що нагрівається. В результаті нагріву за описаною технологією температура нагріву не може бути більш $+100^{\circ}\text{C}$. Тому процес солевідкладання в трубах 2 різко скорочується до мінімуму порівняно з процесом в печі типу ПТБ. Оскільки передача тепла згорання паливного газу в ПП протікає через стінку в два рівні, теплова ефективність сучасних шляхових підігрівачів складає більше 80 % , але є нижчим ніж у ПТБ. Пучок жарових

труб іноді замінюють прямокутним П-подібним каналом. Для потужніших підігрівачів таких каналів є дві форсунки для подачі паливного газу і відповідно два димоходи.

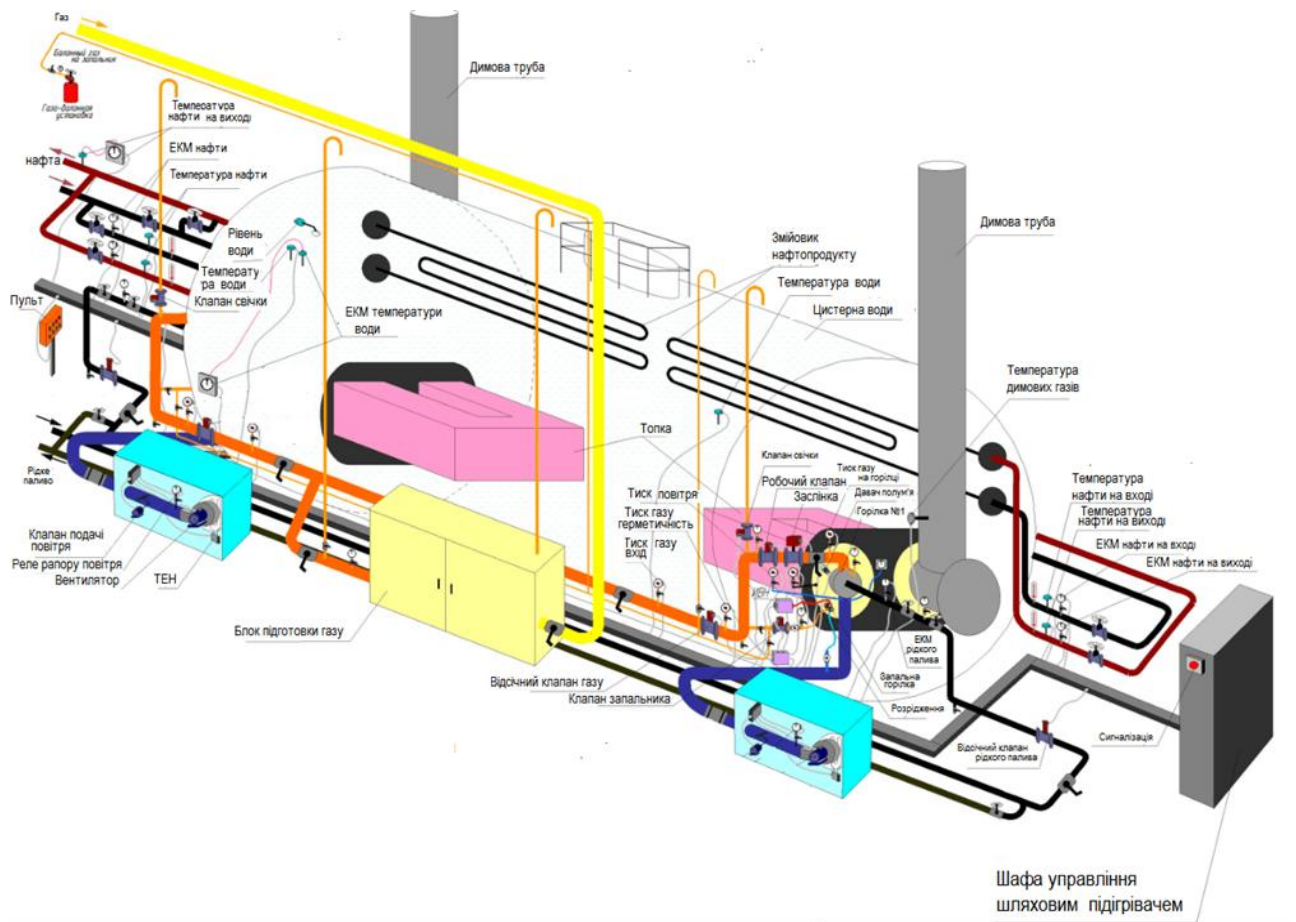


Рисунок 2.2 – Шляховий підігрівач ПП-1,6 (конструкція з елементами автоматики)

Основними показниками якості роботи шляхового підігрівача є:

- продуктивність;
- корисне теплове навантаження;
- теплове напруження радіантних труб;
- площа поверхневого нагріву;
- коефіцієнт корисної дії.

На основі аналізу процесу теплопередачі у шляховому підігрівачі з проміжним теплоносієм, а також основних технологічних параметрів контролю

та регулювання, була розроблена структурна схема підігрівача як об'єкта автоматизації (рис. 2.3).

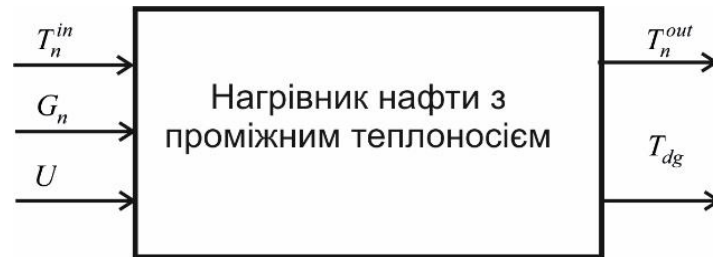


Рисунок 2.3 – Функціональна схема підігрівача як об'єкта керування

Групу вхідних величин утворюють – температура нафти T_n^{in} на вході в нагрівник, масова витрата нафти G_n та керуюча дія U , сигнал якої поступає на виконавчий пристрій змінює подачу палива до форсунок нагрівника. Вихідними величинами об'єкта є температура нафти T_n^{out} на виході нагрівника та температура димових газів T_{dg} .

Математичний опис підігрівача виконано при наступних припущеннях:

- продуктовий теплообмінник і газохід замінюється зосередженою ланкою, у якої поверхні обміну, товщина і маса металу стінок відповідають тим же параметрам реальних елементів підігрівача;
- 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.

2.3. Математична модель непрямого нагрівача нафти

Математичну модель нагрівника з проміжним теплоносієм створена на основі аналізу руху теплових потоків у технологічному апараті (рис. 2.4).

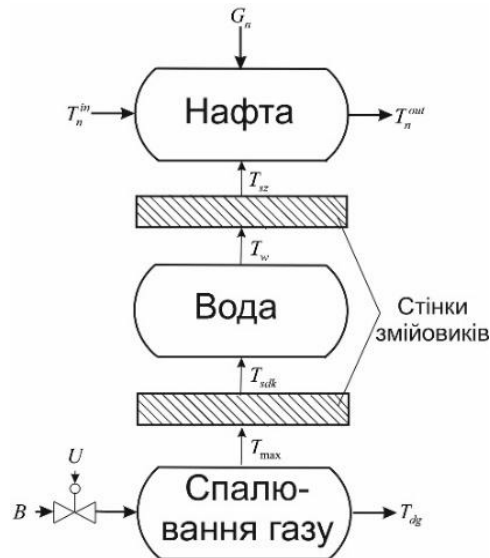


Рисунок 2.4 – Схема теплових потоків нагрівника

На основі рівняння теплового балансу [37], [38] (рис. 2.4)

$$\frac{dQ}{dt} = \sum_{i=1}^n q_i \quad (2.1)$$

запишемо рівняння для робочого продукту.

Накопичене тепло Q робочим тілом при зроблених допущеннях обчислюють за такою формулою:

$$Q = M_n c_n T_{ncp}, \quad (2.2)$$

де M_n - маса продукту (нафти) у змійовику; T_{ncp} - середня температура робочого середовища (нафти); c_n - середня теплоємність продукту.

Теплові потоки q_1 і q_2 направлені до робочого тіла. Потік q_1 переносить тепло з масовим потоком G_n , температура якого T_n^{in} , а потік q_2 зумовлений конвекцією тепла від стінки змійовика до робочого тіла.

Теплові потоки q_1 і q_2 обчислені [34] за такими формулами:

$$q_1 = G_n c_n T_n^{in}, \quad (2.3)$$

$$q_2 = C_{sz}^n F_z (T_{sz} - T_{ncp}), \quad (2.4)$$

де C_{sz}^n - коефіцієнт теплопередачі від стінки до середовища (нафти), що нагрівається; G_n - масова витрата продукту на вході в змійовик;

F_z — площа поверхні обміну змійовика;

T_{sz} - середня температура стінки змійовика підігріву.

Величина потоку q_3 є такою [39, 40]:

$$q_3 = G_n c_n T_n^{out}, \quad (2.5)$$

де T_n^{out} - температура нафти на виході із нагрівача.

Тепловий потік q_3 з масовою витратою G_n покидає теплову ємність і в рівнянні теплового балансу (2.1) буде мати знак «мінус».

Після підстановки значень q_1 , q_2 і q_3 , які визначенні формулами (2.3) – (2.5), у рівняння (2.1), отримали

$$M_n c_n \frac{dT_{ncp}}{dt} = G_n c_n T_n^{in} + C_{sz}^n F_z (T_{sz} - T_{ncp}) - G_n c_n T_n^{out}.$$

Останнє рівняння подамо у такому вигляді:

$$\frac{M_n c_n}{C_{sz}^n F_z} \frac{dT_{ncp}}{dt} + T_{ncp} = \frac{c_n}{C_{sz}^n F_z} G_n (T_n^{in} - T_n^{out}) + T_{sz}$$

Введемо такі позначення: $\tau_n = \frac{M_n \cdot c_n}{C_{sz}^n F_z}$ — постійна часу; $k_{n,l} = \frac{c_n}{C_{sz}^n F_z}$;

$T_{ncp} = \frac{1}{2} (T_n^{in} + T_n^{out})$. Тоді будемо мати

$$\tau_n \frac{dT_{ncp}}{dt} + T_{ncp} = -k_{n,l} G_n (T_n^{out} - T_n^{in}) + T_{sz}, \quad (2.6)$$

Рівняння (2.6) описує динаміку процесу нагрівання нафти в змійовику.

Тепло від теплоносія (води), яка є акумулятором теплової енергії, передається через стінку змійовика (рис. 2.4) робочому середовищу (нафті).

Закон збереження кількості тепла для змійовика запишемо у такому вигляді:

$$M_z c_z \frac{dT_{sz}}{dt} = q_w^{sz} - q_{sz}^w. \quad (2.7)$$

Тепловий потік від води до тіла змійовика визначають за такою формулою [40]:

$$q_w^{sz} = C_w^{cz} F_z (T_w - T_{sz}), \quad (2.8)$$

а тепловий потік q_{sz}^w від нафти до стінки змійовика є таким:

$$q_{sz}^w = C_{cz}^w F_z (T_{sz} - T_{ncp}), \quad (2.9)$$

де C_w^{cz} і C_{cz}^w - коефіцієнти теплопередачі від води до нафти і від нафти до води;

T_{sz} - середня температура стінки змійовика.

З врахуванням формул (2.8) і (2.9) рівняння матеріального балансу (2.7) набуде такого вигляду:

$$M_z c_z \frac{dT_{sz}}{dt} + (C_w^{cz} + C_{cz}^w) F_z T_{sz} = F_z (C_w^{cz} T_w + C_{cz}^w T_{ncp}). \quad (2.10)$$

Рівняння (2.10) запишемо у стандартній формі [38]

$$\frac{M_z c_z}{(C_w^{cz} + C_{cz}^w) F_z} \cdot \frac{dT_{sz}}{dt} + T_{sz} = \frac{C_w^{cz}}{C_w^{cz} + C_{cz}^w} T_w + \frac{C_{cz}^w}{C_w^{cz} + C_{cz}^w} T_{ncp}.$$

Після введення позначень:

$$\tau_{sz} = \frac{M_z c_z}{(C_w^{cz} + C_{cz}^w) F_z}; \quad k_{wep} = \frac{C_w^{cz}}{C_w^{cz} + C_{cz}^w}; \quad k_{nep} = \frac{C_{cz}^w}{C_w^{cz} + C_{cz}^w}$$

будемо мати

$$\tau_{sz} \frac{dT_{sz}}{dt} + T_{sz} = k_{wcp} T_w + k_{ncp} T_{ncp}. \quad (2.11)$$

Рівняння (2.11) є проміжним рівнянням і служить для визначення температури T_{sz} , яка фігурує у рівнянні (2.6).

Рівняння матеріального балансу (2.1) для ванни з водою, має у правій частині дві складові q_1^w і q_2^w , які є такими [39]:

$$q_1^w = C_{sdk}^w F_{dk} (T_{sdk} - T_w); \quad (2.12)$$

$$q_2^w = C_w^{sz} F_z (T_w - T_{sz}), \quad (2.13)$$

а накопичення тепла у ванні з водою Q_w визначається формулою, яка аналогічна (2.2), тобто

$$Q_w = M_w c_w T_w, \quad (2.14)$$

де c_w - теплоємність води;

T_w - середня температура води у ванній;

M_w - маса води у водяній бані;

C_{sdk}^w - коефіцієнт теплопередачі від води до стінки димового каналу;

T_{sdk} - температура стінки димового каналу.

F_{dk} – площа димового каналу, який занурений у водяну ванну.

Підстановка (2.12) – (2.14) в (2.1) дала такий результат:

$$M_w c_w \frac{dT_w}{dt} = C_{sdk}^w F_{dk} (T_{sdk} - T_w) - C_w^{sz} F_z (T_w - T_{sz}). \quad (2.15)$$

Рівняння (2.15) приведемо до такого вигляду як і рівняння (2.11)

$$\frac{M_w c_w}{C_{sdk}^w F_{dk} + C_w^{sz} F_z} \cdot \frac{dT_w}{dt} + T_w = \frac{C_{sdk}^w F_{dk}}{C_{sdk}^w F_{dk} + C_w^{sz} F_z} T_{sdk} + \frac{C_w^{sz} F_z}{C_{sdk}^w F_{dk} + C_w^{sz} F_z} T_{sz}. \quad (2.16)$$

Якщо ввести такі позначення:

$$\tau_w = \frac{M_w c_w}{C_{sdk}^w F_{dk} + C_w^{sz} F_z}; \quad k_{sdk} = \frac{C_{sdk}^w F_{dk}}{C_{sdk}^w F_{dk} + C_w^{sz} F_z}; \quad k_{sz} = \frac{C_w^{sz} F_z}{C_{sdk}^w F_{dk} + C_w^{sz} F_z}, \quad \text{то (2.16) набуде}$$

такого вигляду:

$$\tau_w \frac{dT_w}{dt} + T_w = k_{sdk} T_{sdk} + k_{sz} T_{sz}. \quad (2.17)$$

Рівняння теплового балансу (2.1) для продуктів згоряння у правій частині, матиме три складові:

q_1^h – тепло, що виділилось внаслідок спалювання природного газу і топці нагрівача;

q_2^h – тепло, передане від димових газів водяній ванні;

q_3^h – втрата тепла з димовими газами.

Тепло q_1^h , яке виділилось внаслідок спалювання одного кілограма природного газу обчислюють [41] за такою формулою:

$$q_1^h = q_g^h + c_g T_g + \alpha L_0 c_a T_a, \quad (2.18)$$

де q_g^h -теплота згоряння природного газу;

c_g і c_a – теплоємності газу і повітря;

T_g і T_a – температури газу і повітря;

L_0 – витрати повітря на спалювання одного кілограма природного газу;

α -надлишок повітря.

У рівнянні (2.18) друга і третя складові значно менші за q_g^h . Тому цими складовими можна знехтувати.

Втрати тепла на 1 кг палива, які передані проміжному теплоносію, і втратами в навколишнє середовище

$$q_h^{out} = q_{dg} + q_{ev} + q_{dg}^{out}.$$

де q_{dg} - тепло передане від продуктів згоряння проміжному теплоносію;

$q_{ev} = k_{ev} q_g^h$ - втрати тепла в навколишнє середовище;

q_{dg}^{out} - тепло, що переносять димові гази.

Допускають [38]:

$$q_{ev} + q_{dg}^{out} = \eta_T q_g^h,$$

де η_T - теплова ефективність топкового простору.

Теплоємність димових газів, які утворились при спалюванні природного газу, обчислюють [42] за такою формулою:

$$c_{dg} = \mu_{CO_2} c_{CO_2} + \mu_{H_2O} c_{H_2O} + \mu_{O_2} c_{O_2} + \mu_{N_2} c_{N_2}, \quad (2.19)$$

де μ і c - з відповідними індексами масова доля і теплоємність складових.

Залежність (2.19) є незручною для практичних цілей. Тому в [38] її апроксимують поліномом другої степені:

$$c_{dg} = a_0^g + a_1^g (T_{dg} - 273) + a_2^g (T_{dg} - 273)^2, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ K),$$

де $a_0^g = 1,076$; $a_1^g = 2,50 \cdot 10^{-4}$; $a_2^g = -1,723 \cdot 10^{-8}$;

T_{dg} - температура димових газів.

Втрати тепла з димовими газами є такими:

$$q_{dg}^{out} = c_{dg}^{out} T_{dg}^{out}.$$

де c_{dg}^{out} - теплоємність димових газів на виході із топки;

T_{dg}^{out} - температура димових газів на виході із топки.

Тепло, що передається димовим газам

$$\eta_T q_g^h = g_{dg}^{fuel} c_{dg}^{cp} (T_{ct}^{max} - T_0), \quad (2.20)$$

де g_{dg}^{fuel} - кількість ($\text{кг}/\text{с}$) продуктів згоряння, яка утворилась при спалюванні 1 кг природного газу;

c_{dg}^{cp} - середня теплоємність природного газу;

T_{ct}^{max} - максимальна температура горіння, до якої прирівнюється температура димових газів.

Початкова температура T_0 паливної суміші є такою [42]:

$$T_0 = \frac{c_g T_g + \alpha L_0 c_a T_a}{g_{dg}^{fuel} c_{dg}^{cp}}. \quad (2.21)$$

Значення температури T_{ct}^{max} визначили із формули (2.20):

$$T_{ct}^{max} = \frac{\eta_T q_g^h}{g_{dg}^{fuel} c_{dg}^{cp}} + T_0. \quad (2.22)$$

Для визначення витрати паливного газу, скористаємось формулою, яка визначає статичний режим

$$B_0 q_g^h \eta_{ht} = G_{n0} c_n (T_{n0}^{out} - T_{n0}^{in}).$$

Остання рівність дає змогу визначити витрату паливного газу

$$B_0 = \frac{G_{n0} c_n (T_{n0}^{out} - T_{n0}^{in})}{q_g^h \eta_{ht}}, \quad (2.23)$$

де η_{ht} - тепловий ККД нагрівника.

Подача паливного газу до форсунок топки (Рис. 2.1) регулюється виконавчим пристроєм, виконавчим органом якого є регулюючий клапан. Якщо $\beta_g(U)$ - статична характеристика виконавчого механізму, то справедливим є таке співвідношення:

$$G_g^{fuel} = \beta_g(U) B_{max}, \quad (2.24)$$

де U - керуюча дія; B_{max} - максимальна масова витрата паливного газу.

У статичному режимі робоча точка регулюючого органу виконавчого механізму повинна знаходитись посередині його статичної характеристики. Для статичного режиму $G_g^{fuel} = B_0$. Тоді рівняння (2.24) буде таким:

$$B_0 = \beta_g(U_0) B_{max}.$$

Звідси знаходимо

$$B_{max} = \frac{B_0}{\beta_g(U_0)}$$

Тепло від димових газів передається стінці димоходу. Така передача здійснюється за допомогою двох процесів – променевого і конвекційного теплообміну.

Тепло, отримане стінкою димоходу у результаті променевого теплообміну обчислюють [42] за такою формулою:

$$q_{rh} = 0,5 \cdot 10^{-8} \psi (\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left(\varepsilon_{dg} (T_{dg}^{cp})^4 - A_{dg} T_{sdk}^4 \right), \quad (2.25)$$

де ψ -коефіцієнт, який враховує розподіл тепла в топці в результаті горіння факела;

ε_c - ступінь чорноти стінки димоходу;

ε_{dg} - ступінь чорноти димових газів при середній температурі:

A_{dg} - поглинаюча спроможність димових газів при температурі поверхні T_{sdk} .

Коефіцієнти ε_{dg} і A_{dg} обчислюють для статичного режиму і при малих відхиленнях температур від своїх усталених значень, їх вважають постійними.

Значення A_{dg} можна отримати, якщо скористатись емпіричною залежністю [42]:

$$A_{dg} = k_{\varepsilon} \tilde{\varepsilon}_{CO_2} \tau_{dg}^{0,65} + k_{\varepsilon h} \tilde{\varepsilon}_{H_2O} \tau_{dg}^{0,45} - \Delta\alpha,$$

де k_{ε} , $k_{\varepsilon h}$ - емпіричні коефіцієнти;

$\tilde{\varepsilon}_{CO_2}$ і $\tilde{\varepsilon}_{H_2O}$ - ступені чорноти димового каналу;

$\Delta\alpha$ - поправочна величина.

Процес конвенційного теплообміну, за допомогою якого тепло від димових газів передається стінці димоходу, описується такою залежністю:

$$q_k^h = C_{dg}^{sdk} F_{dk} (T_{dg}^{cp} - T_{sdk}), \quad (2.26)$$

де C_{dg}^{sdk} - коефіцієнт теплопередачі від димових газів до стінки жарової труби; середнє значення

$$T_{dg}^{cp} = 0,5 (T_{ct}^{max} + T_{dg}^{out}). \quad (2.27)$$

Значення C_{dg}^{sdk} є таким [42]:

$$C_{dg}^{sdk} = k_{dg} (T_{dg}^{cp} - T_{sdk})^{1/4},$$

де k_{dg} - емпіричний коефіцієнт.

З врахуванням значення C_{dg}^{sdk} вираз (2.26) набуде такого значення:

$$q_k^h = k_{dg} F_{dk} (T_{dg}^{cp} - T_{sdk})^{5/4}. \quad (2.28)$$

Отже, тепло, яке передається від димових до стінки димоходу є адитивною функцією складових (2.25) і (2.28), тобто

$$q_3^h = q_r^h + q_k^h. \quad (2.29)$$

Оскільки складові q_r^h і q_k^h визначені формулами (2.25) і (2.28), то вираз (2.29) набуде такого вигляду:

$$q_3^h = 0,5 \cdot 10^{-8} \Psi(\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left(\varepsilon_{dg} (T_{dg}^{cp})^4 - A_{dg} T_{sdk}^4 \right) + k_{dg} F_{dk} (T_{dg}^{cp} - T_{sdk})^{5/4}. \quad (2.30)$$

Складову q_2^h , яка описує процес передачі від димових газів проміжному теплоносію (воді), залежить від масової витрати димових газів G_{dg} і температури T_{dg}^{out} на виході із димової труби, тобто

$$q_2^h = G_{dg} C_{dg}^{out} T_{dg}^{out}. \quad (2.31)$$

Продукти згоряння, які рухаються по жаровій трубі, передають теплову енергію проміжному теплоносію:

$$q_1^h = G_g^{fuel} \eta_T q_g^h.$$

Якщо врахувати формулу (2.24), то отримаємо

$$q_1^h = \beta_g(U) B_{max} \eta_T q_g^h. \quad (2.32)$$

Тепло, накопичене в умовній ємності димового тракту, обчислюють за середнім значенням

$$Q_{dg}^{cp} = V_{dg} \rho_{dg}^{cp} c_{dg}^{cp} T_{dg}^{cp}, \quad (2.33)$$

Де V_{dg} – об'єм димового каналу. Складові рівняння теплового балансу (2.1) визначені формулами (2.30) – (2.33). Після їх підстановки (з врахуванням

відповідних знаків складових q_1^h , q_2^h і q_3^h) в рівняння матеріального балансу (2.1), прийшли до такого результату:

$$V_{dg} \rho_{dg}^{cp} c_{dg}^{cp} \frac{dT_{dg}^{cp}}{dt} = \beta_g(U) B_{max} \eta_T q_g^h - G_{dg} c_{dg}^{out} T_{dg}^{out} - \\ - 0,5 \cdot 10^{-8} \Psi(\epsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left(\epsilon_{dg} (T_{dg}^{cp})^4 - A_{dg} T_{sdk}^4 \right) - k_{dg} F_{dk} (T_{dg}^{cp} - T_{sdk})^{5/4}.$$

Якщо врахувати значення T_{dg}^{cp} , яке визначено формулою (2.27), то останнє рівняння буде таким:

$$0,5 V_{dg} \rho_{dg}^{cp} c_{dg}^{cp} \frac{dT_{dg}^{cp}}{dt} = \beta_g(U) B_{max} \eta_T q_g^h - G_{dg} c_{dg}^{out} T_{dg}^{out} - \\ - 0,5 \cdot 10^{-8} \Psi(\epsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left(\epsilon_{dg} (T_{dg}^{cp})^4 - A_{dg} T_{sdk}^4 \right) - k_{dg} F_{dk} (T_{dg}^{cp} - T_{sdk})^{5/4}. \quad 2.34$$

У рівняння (2.34) входить масова витрата G_{dg} димових газів, яка є функцією ступені відкриття регулюючого органу і обчислюється [38] за такою формулою:

$$G_{dg} = \beta(U) B_{max} (1 + \alpha L_0), \quad (2.35)$$

де α - коефіцієнт надлишку повітря;

L_0 - кількість повітря, яка необхідна для повного згорання 1 кг палива.

З врахуванням (2.35) диференціальне рівняння (2.34) буде таким:

$$0,5 V_{dg} \rho_{dg}^{cp} c_{dg}^{cp} \frac{dT_{dg}^{out}}{dt} = \beta_g(U) \left(B_{max} \eta_T q_g^h - c_{dg}^{out} B_{max} (1 + \alpha L_0) (T_{dg}^{out} - 273) \right) - \\ - 0,5 \cdot 10^{-8} \Psi(\epsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left(\epsilon_{dg} \left(0,5 (T_{ct}^{max} + T_{dg}^{out}) \right)^4 - A_{dg} T_{sdk}^4 \right) - \\ - k_{dg} F_{dk} \left(0,5 (T_{ct}^{max} + T_{dg}^{out}) - T_{sdk} \right)^{5/4}. \quad (2.36)$$

Введемо такі позначення:

$$L_{vp} = 0,5 V_{dg} \rho_{dg}^{cp} c_{dg}^{cp};$$

$$k_1 = c_{dg}^{out} B_{max} (1 + \alpha L_0);$$

$$k_2 = 0,5 \cdot 10^{-8} \psi(\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \varepsilon_{dg};$$

$$k_3 = 0,5 \cdot 10^{-8} \psi(\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} A_{dg};$$

$$k_4 = k_{dg} F_{dk}; \quad k_5 = B_{max} \eta_T q_g^h.$$

З врахуванням прийнятих позначень, рівняння (2.36) прийняло такий вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{dg}^{out}}{dt} = \frac{1}{L_{vp}} & \left((k_5 - k_1 T_{dg}^{out}) \beta_g(U) - \right. \\ & \left. - \left(k_2 \left(0,5 (T_{ct}^{max} + T_{dg}^{out}) \right)^4 - k_3 T_{sdk}^4 \right) - k_4 \left(0,5 (T_{ct}^{max} + T_{dg}^{out}) - T_{sdk} \right)^{5/4} \right). \end{aligned} \quad (2.37)$$

Для повного опису динаміки нагрівача з проміжним теплоносієм необхідно мати рівняння, яке описує передачу тепла від димових газів через стінку жарової труби до проміжного теплоносія.

Величина теплового потоку q_1^w , який передається від стінки жарової труби проміжному теплоносію, визначена формулою (2.12), тепло q_3^h , що отримує жарова труба від проміжного теплоносія (води) – формулою (2.30).

Тепло, накопичене у жаровій трубі:

$$Q_{ft} = M_{dk} c_{dk} T_{sdk}, \quad (2.38)$$

де M_{dk} - маса жарової труби.

Отже, рівняння теплового балансу (2.1) для стінки жарової труби, матиме такий вигляд:

$$\frac{dQ_{ft}}{dt} = q_3^h - q_1^w. \quad (2.39)$$

Після врахування формул (2.12), (2.30) і (2.38) рівняння теплового балансу для жарової труби буде таким:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{sdk}}{dt} = \frac{1}{L_{ft}} & \left(0,5 \cdot 10^{-8} \psi(\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left(\varepsilon_{dg} \left(0,5 (T_{ct}^{max} + T_{dg}^{out}) \right)^4 - A_{dg} T_{sdk}^4 \right) + \right. \\ & \left. + k_{dg} F_{dk} \left(0,5 (T_{ct}^{max} + T_{dg}^{out}) - T_{sdk} \right)^{5/4} - C_{sdk}^w F_{dk} (T_{sdk} - T_w) \right), \end{aligned} \quad (2.40)$$

де $L_{ft} = M_{dk} c_{dk}$.

Система диференціальних рівнянь (2.6), (2.11), (2.17), (2.37) і (2.40) утворюють математичну модель нагрівника з проміжним теплоносієм як об'єкта автоматичного керування.

Початкові умови для системи диференціальних рівнянь (2.6), (2.11), (2.17), (2.37) і (2.40) визначаються значенням відповідних температур у статичному режимі роботи нагрівника з проміжним теплоносієм.

2.4. Лінеаризована математична модель непрямого нагрівача нафти

Допускаємо, що відхилення температур, які фігурують у лівих частинах системи диференціальних рівнянь (2.6), (2.11), (2.17), (2.37) і (2.40), від своїх усталених значень такі, що при розкладі нелінійних функцій, розміщених у правих частинах рівнянь (2.6), (2.11), (2.17), (2.37) і (2.40) невеликі. Тоді при розкладі відповідних нелінійних функцій в ряд Тейлора можна знехтувати членами, порядок яких не менше двох.

Усталені значення вхідних і вихідних величин (рис. 2.4) будемо позначати рядом з існуючими індексами додатковим індексом «0».

Систему рівнянь (2.6), (2.11), (2.17), (2.37) і (2.40) запишемо в дещо іншому порядку

$$\tau_n \frac{dT_{ncp}}{dt} + T_{ncp} = \varphi_0(T_n^{out}, T_n^{in}, G_n) + k_{n,2} T_{sz}, \quad (2.41)$$

$$\frac{dT_{dg}^{out}}{dt} = \varphi_1(T_n^{out}, T_{dg}^{out}, T_{sdk}, U), \quad (2.42)$$

$$\tau_{sz} \frac{dT_{sz}}{dt} + T_{sz} = k_{wcp} T_w + k_{ncp} T_{ncp}, \quad (2.43)$$

$$\tau_w \frac{dT_w}{dt} + T_w = k_{sdk} T_{sdk} + k_{sz} T_{sz}, \quad (2.44)$$

$$\frac{dT_{sdk}}{dt} = \varphi_2(T_g^{out}, T_w, T_{sdk}), \quad (2.45)$$

де $\varphi_0 = -2k_{n,1}G_n(T_n^{out} - T_n^{in})$,

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \frac{1}{L_{\nu\rho}} \left((k_5 - k_1 T_{dg}^{out}) \beta_g(U) - \right. \\ &\quad \left. - \left(k_2 \left(0,5(T_{ct}^{max} + T_{dg}^{out}) \right)^4 - k_3 T_{sdk}^4 \right) - k_4 \left(0,5(T_{ct}^{max} + T_{dg}^{out}) - T_{sdk} \right)^{5/4} \right), \\ \varphi_2 &= \frac{1}{L_{fi}} \left(0,5 \cdot 10^{-8} \psi(\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left(\varepsilon_{dg} \left(0,5(T_{ct}^{max} + T_{dg}^{out}) \right)^4 - A_{dg} T_{sdk}^4 \right) + \right. \\ &\quad \left. + k_{dg} F_{dk} \left(0,5(T_{ct}^{max} + T_{dg}^{out}) - T_{sdk} \right)^{5/4} - C_{sdk}^w F_{dk} (T_{sdk} - T_w) \right).\end{aligned}$$

При лінеаризації рівняння (2.41) враховано значення T_{ncp} , що пояснює появу коефіцієнта «2».

Відмітимо, рівняння (2.43) і (2.44) – лінійні відносно своїх змінних.

Рівняння (2.41), (2.42) і (2.45) лінеаризуємо: позначимо через θ (з відповідними індексами) відхилення вхідних і вихідних температур від своїх усталених значень. Інші позначення є такими: $u = \Delta U$, $g_n = \Delta G_n$, де $\Delta U = U - U_0$, $\Delta G_n = G_n - G_{n0}$.

Після проведення операції лінеаризації [38, 43] отримаємо таку систему диференціальних рівнянь:

$$(\tau_n s + 1 + k_{\theta n}) \theta_n^{out}(s) = (k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) \theta_n^{in}(s) + 2\theta_{sz}(s) + k_g g_n(s), \quad (2.46)$$

$$(\tau_{\theta 1} s + 1) \theta_{dg}^{out}(s) = K_{\theta 1} \theta_{sdk}(s) + K_u u(s), \quad (2.47)$$

$$(\tau_{sz} s + 1) \theta_{sz}(s) = k_{wep} \theta_w(s) + 0,5 k_{nep} (\theta_n^{in}(s) + \theta_n^{out}(s)), \quad (2.48)$$

$$(\tau_w s + 1) \theta_w(s) = k_{sdk} \theta_{sdk}(s) + k_{sz} \cdot \theta_{sz}(s), \quad (2.49)$$

$$(\tau_{t,1} s + 1) \theta_{sdk}(s) = K_{t,1} \theta_{dg}(s) + K_{t,2} \theta_w(s), \quad (2.50)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \tau_{\theta 1} &= \frac{0,5L_1}{k_{\theta,1}}; \quad K_{\theta,1} = \frac{k_{\theta,2}}{k_{\theta,1}}; \quad K_u = \frac{k_u}{k_{\theta,1}}; \quad \tau_{t,1} = \frac{M_{dk} \cdot c_{dk}}{k_{t,1}}; \quad K_{t,1} = \frac{k_{t,2}}{k_{t,1}}; \quad K_{t,2} = \frac{k_{t,3}}{k_{t,1}}; \quad k_g = \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial G_n} \right)_0; \\ k_{\theta n} &= \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial T_n^{out}} \right)_0 = - \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial T_n^{in}} \right)_0; \quad k_{\theta,1} = - \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial T_{dg \uparrow}} \right)_0; \quad k_{\theta,2} = \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial T_{sdk}} \right)_0; \quad k_u = \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial U} \right)_0; \quad k_{t,1} = - \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial T_{dg \uparrow}} \right)_0; \\ k_{t,2} &= \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial T_{sdk}} \right)_0; \quad k_{t,3} = \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial T_w} \right)_0; \end{aligned}$$

Три останні рівняння (2.48) – (2.50) вміщують проміжні змінні θ_{sdk} , θ_w і θ_{sz} . Для їх визначення скористаємося системою рівнянь, яку утворимо із (2.48) – (2.50). Отже,

$$-k_{wep} \theta_w(s) + (\tau_{sz}s + 1) \theta_{sz}(s) = 0.5k_{nep} (\theta_n^{in}(s) + \theta_n^{out}(s)), \quad (2.51)$$

$$-k_{sdk} \theta_{sdk}(s) + (\tau_ws + 1) \theta_w(s) - k_{sz} \theta_{sz}(s) = 0, \quad (2.52)$$

$$(\tau_{t,1}s + 1) \theta_{sdk}(s) - K_{t,2} \theta_w(s) = K_{t,1} \theta_{dg}(s). \quad (2.53)$$

Після введення позначень:

$$\alpha_{12} = -k_{wep}; \quad \alpha_{13} = \tau_{sz}s + 1;$$

$$\alpha_{21} = -k_{sdk}; \quad \alpha_{22} = \tau_ws + 1; \quad \alpha_{23} = -k_{sz};$$

$$\alpha_{31} = \tau_{t,1}s + 1; \quad \alpha_{32} = -K_{t,2}.$$

$$\alpha_{11} = 0; \quad \alpha_{33} = 0; \quad \pi_2 = 0.$$

$$\pi_1 = 0.5k_{nep} (\theta_n^{in}(s) + \theta_n^{out}(s));$$

$$\pi_3 = K_{t,1} \theta_{dg}(s).$$

система рівнянь (2.51) – (2.53) буде такою:

$$\alpha_{11} \theta_{sdk}(s) + \alpha_{12} \theta_w(s) + \alpha_{13} \theta_{sz}(s) = \pi_1,$$

$$\alpha_{21}\theta_{sdk}(s) + \alpha_{22}\theta_w(s) + \alpha_{23}\theta_{sz}(s) = \pi_2,$$

$$\alpha_{31}\theta_{sdk}(s) + \alpha_{32}\theta_w(s) + \alpha_{33}\theta_{sz}(s) = \pi_3.$$

Отриману систему рівнянь подамо у векторно-матричній формі

$$A\bar{\theta} = \bar{\pi}, \quad (2.54)$$

$$\text{де } A = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix}; \quad \bar{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_{sdk} \\ \theta_w \\ \theta_{sz} \end{bmatrix}; \quad \bar{\pi} = \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \end{bmatrix}.$$

Із рівняння (2.54) знаходимо

$$\bar{\theta} = A^{-1}\bar{\pi}. \quad (2.55)$$

Після виконання відповідних дій, рівняння (2.55) дало такий результат:

$$\theta_{sdk} = \frac{1}{\Delta} (\pi_3 (\alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{13}\alpha_{22}) - \pi_1\alpha_{23}\alpha_{32});$$

$$\theta_w = \frac{1}{\Delta} (\pi_3\alpha_{13}\alpha_{21} + \pi_1\alpha_{23}\alpha_{31});$$

$$\theta_{sz}(s) = \frac{1}{\Delta} (\pi_1 (\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31}) - \pi_3\alpha_{12}\alpha_{21}),$$

де

$$\Delta = \alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} + \alpha_{13}\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{13}\alpha_{22}\alpha_{31}.$$

Отримані значення θ_{sdk} і $\theta_{sz}(s)$ підставимо у вирази (2.46) і (2.47). Якщо врахувати значення π_1 і π_3 , то отримаємо

$$\left((\tau_n s + 1 + k_{\theta n}) - \frac{k_{nep} (\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})}{\Delta} \right) \theta_n^{out}(s) + \frac{2}{\Delta} \alpha_{12}\alpha_{21} K_{t,1} \theta_{dg}(s) =$$

$$= \left((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) + \frac{k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})}{\Delta} \right) \theta_n^{in}(s) + k_g g_n(s), \quad (2.56)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\Delta} k_{nep} K_{\theta 1} \alpha_{23} \alpha_{32} \theta_n^{out}(s) + \left((\tau_{\theta 1} s + 1) - \frac{K_{\theta 1} K_{t,1}}{\Delta} (\alpha_{12} \alpha_{23} - \alpha_{13} \alpha_{22}) \right) \theta_{dg}(s) = \\ & = -\frac{1}{2\Delta} k_{nep} K_{\theta 1} \alpha_{23} \alpha_{32} \theta_n^{in}(s) + K_u u(s). \end{aligned} \quad (2.57)$$

Систему рівнянь (2.56) і (2.57) об'єднаємо в одне векторно-матричне рівняння, тобто

$$A \bar{Y}(s) = \bar{b}, \quad (2.58)$$

$$\text{де } A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}; \quad \bar{Y}(s) = \begin{bmatrix} \theta_n^{out} \\ \theta_n \end{bmatrix}; \quad \bar{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix};$$

$$A_{11}(s) = \tau_n s + 1 + k_{\theta n} - \frac{k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})}{\Delta}; \quad A_{12}(s) = \frac{2}{\Delta} \alpha_{12} \alpha_{21} K_{t,1};$$

$$A_{21}(s) = \frac{1}{2\Delta} k_{nep} K_{\theta 1} \alpha_{23} \alpha_{32}; \quad A_{22}(s) = \tau_{\theta 1} s + 1 - \frac{K_{\theta 1} K_{t,1}}{\Delta} (\alpha_{12} \alpha_{23} - \alpha_{13} \alpha_{22}).$$

$$b_1 = \left((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) + \frac{k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})}{\Delta} \right) \theta_n^{in}(s) + k_g g_n(s),$$

$$b_2 = -\frac{1}{2\Delta} k_{nep} K_{\theta 1} \alpha_{23} \alpha_{32} \theta_n^{in}(s) + K_u u(s).$$

Оскільки виходами об'єкта (нагрівника) є величини θ_n^{out} і $\theta_{dg}(s)$, то із системи рівнянь (2.56) знаходимо

$$Y(s) = A^{-1} \bar{b}. \quad (2.59)$$

Рівняння (2.59) подамо у розгорнутому вигляді:

$$\theta_n^{out} = \frac{1}{\Delta_{out}} (A_{22} b_1 - A_{12} b_2);$$

$$\theta_{dg} = \frac{1}{\Delta_{out}} (A_{11}b_2 - A_{21}b_1),$$

$$\text{де } \Delta_{out} = A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21}.$$

Якщо врахувати значення b_1 і b_2 , то прийдемо до такого результату:

$$\begin{aligned} \theta_n^{out} = \frac{1}{\Delta \cdot \Delta_{out}} & \left(((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) \Delta + k_{nep} A_{22} (\alpha_{21} \alpha_{32} - \alpha_{22} \alpha_{31})) + \frac{A_{12}}{2} k_{nep} K_{\theta 1} \alpha_{23} \alpha_{32} \right) \theta_n^{in}(s) + \\ & + \frac{k_g A_{22}}{\Delta_{out}} g_n(s) - \frac{K_u A_{12}}{\Delta_{out}} u(s); \end{aligned} \quad (2.60)$$

$$\begin{aligned} \theta_{dg} = -\frac{1}{\Delta} \frac{1}{\Delta_{out}} & \left(\frac{A_{11}}{2} k_{nep} K_{\theta 1} \alpha_{23} \alpha_{32} + A_{21} ((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) \Delta + k_{nep} (\alpha_{21} \alpha_{32} - \alpha_{22} \alpha_{31})) \right) \theta_n^{in}(s) - \\ & - \frac{k_g A_{21}}{\Delta_{out}} g_n(s) + \frac{A_{11} K_u}{\Delta_{out}} u(s). \end{aligned} \quad (2.61)$$

Отримані рівняння (2.60) і (2.61) дають змогу визначити шість передавальних функцій, які характеризують динаміку непрямого нагрівника нафти. Отже,

$$w_{11}(s) = \frac{1}{\Delta \cdot \Delta_{out}} \left(A_{22} ((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) \Delta + k_{nep} (\alpha_{21} \alpha_{32} - \alpha_{22} \alpha_{31})) + \frac{A_{12}}{2} k_{nep} K_{\theta 1} \alpha_{23} \alpha_{32} \right);$$

$$w_{12}(s) = \frac{k_g A_{22}}{\Delta_{out}}; \quad w_{13}(s) = -\frac{K_u A_{12}}{\Delta_{out}}.$$

$$w_{21}(s) = -\frac{1}{\Delta} \cdot \frac{1}{\Delta_{out}} \left(\frac{A_{11}}{2} k_{nep} K_{\theta 1} \alpha_{23} \alpha_{32} + A_{21} ((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) \Delta + k_{nep} (\alpha_{21} \alpha_{32} - \alpha_{22} \alpha_{31})) \right);$$

$$w_{22}(s) = -\frac{k_g A_{21}}{\Delta_{out}}; \quad w_{23}(s) = \frac{A_{11} K_u}{\Delta_{out}}.$$

Рівняння (2.60) і (2.61) об'єднаємо в одне векторно-матричне рівняння

$$\bar{Y}(s) = W(s)\bar{F}(s), \quad (2.62)$$

$$\text{де } W(s) = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & w_{12}(s) & w_{13}(s) \\ w_{21}(s) & w_{22}(s) & w_{23}(s) \end{bmatrix}; \quad \bar{F}(s) = \begin{bmatrix} \theta_n^{in} \\ g_n \\ u \end{bmatrix}.$$

Матричну передавальну функцію $W(s)$ розіб'ємо на два блоки. Тоді

$$Y(s) = \begin{bmatrix} W_1(s) & W_2(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(s) \\ \bar{f}(s) \end{bmatrix},$$

$$\text{де } W_1(s) = \begin{bmatrix} w_{13}(s) \\ w_{23}(s) \end{bmatrix}; \quad W_2(s) = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & w_{12}(s) \\ w_{21}(s) & w_{22}(s) \end{bmatrix}; \quad \bar{f}(s) = \begin{bmatrix} \theta_n^{in} \\ g_n \end{bmatrix}.$$

Після зроблених позначень векторно-матричне рівняння (2.62) набуде такого вигляду:

$$Y(s) = W_1(s)u(s) + W_2(s)\bar{f}(s). \quad (2.63)$$

У рівнянні (2.63) $\bar{f}(s)$ - вектор зовнішніх збурень, які діють на об'єкт.

Використовуючи рівняння (2.63), створимо структурну схему нагрівника як об'єкта автоматичного керування (Рис. 2.5).

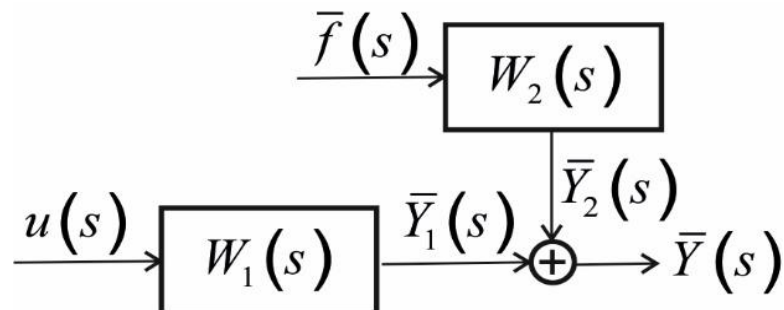


Рисунок 2.5 – Структурна векторно-матрична схема нагрівника як об'єкта керування

На основі системи рівнянь (2.60) і (2.61) створена деталізована структурна схема нагрівника як об'єкта автоматичного керування (Рис. 2.6).

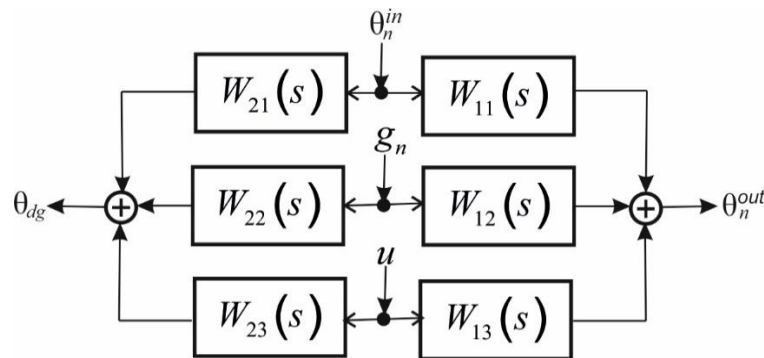


Рисунок 2.6 – Структурна схема нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування

Отримана лінеаризована математична модель нагрівника та його структурна схема (рис. 2.6) є основою для створення ефективної системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти перед її транспортуванням або подачею споживачам.

Висновки до розділу

1. Аналіз процесу нагрівання нафти у шляховому нагрівачі з проміжним теплоносієм як об'єкта автоматичного керування дав змогу виявити вхідні і вихідні величини. Вхідні величини розбиті на дві групи керуюча дія і збурення. Керуючою дією є ступінь закриття регулюючого органу, який визначає кількість подачі природного газу до форсунок печі. Збурюючі дії - зміна кількості нафти на вході нагрівача та його температура. Вихідними параметрами є температура робочого тіла на виході із нагрівача та температура димових газів.

2. З використанням закону збереження кількості тепла та при зроблених допущеннях (нагрівник розглядається як система із зосередженими параметрами) отримана математична модель об'єкта керування (нагрівника), яка формалізує процес передачі тепла від джерела енергії через проміжний теплоносіє (воду) до робочого тіла (нафти).

3. Аналіз математичної моделі шляхового нагрівача з проміжним теплоносієм показав, що така модель є несуттєво нелінійною і при малих відхиленнях вхідних і вихідних величин від своїх усталених значень здійснений процес її лінеаризації.

4. Вилучення проміжних змінних з лінеаризованої математичної моделі дало змогу визначити передавальні функції каналів передачі керуючої дії та збурюючи впливів і на цій основі створити структурну схему нагрівача придатну для синтезу ефективної системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШЛЯХОВОГО НАГРІВАЧА НАФТИ З ПРОМІЖНИМ ТЕПЛОНОСІЄМ

3.1. Розрахунок параметрів статичного режиму роботи нагрівача нафти

Для визначення параметрів лінеаризованих математичної моделі необхідно визначити параметри, які характеризують статичний режим роботи шляхового нагрівача нафти.

Необхідні дані для розрахунку [44, 45] вміщує таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Машинна змінна	Розмірність	Значення
Маса продукту у змійовику	M_n	Mn	кг	$5,35 \cdot 10^3$
Середня теплоємність нафти	C_n	Cn	$\frac{Дж}{кг \cdot K}$	2038
Коефіцієнт теплопередачі від стінки до середовища	C_{sz}^n	Csz_n	$\frac{Вт}{м^2 \cdot K}$	562
Площа поверхні обміну змійовика	F_z	Fz	$м^2$	254
Маса змійовика	M_{zn}	Mzn	кг	$7,996 \cdot 10^3$
Теплоємність стінки змійовика	C_z	cz	$\frac{Дж}{кг \cdot K}$	460
Коефіцієнт теплопередачі від води до стінки	C_w^{sz}	cw_sz	$\frac{Вт}{м^2 \cdot K}$	175
Маса води	M_w	Mw	кг	$9,733 \cdot 10^4$
Теплоємність води	C_w	cw	$\frac{Дж}{кг \cdot K}$	3841
Коефіцієнт теплопередачі від стінки димового каналу до води	C_{sdk}^w	Csdk	$\frac{Вт}{м^2 \cdot K}$	473
Площа поверхні димового каналу	F_{dk}	Fdk	$м^2$	28,5
Максимальна розрахункова температура горіння	T_{max}	Tmax	K	$2,281 \cdot 10^3$
Об'єм димового каналу підігрівника	V_{zdg}	Vzdg	$м^3$	3,013
Середня густина димових газів	ρ_{cpdg}	ro_cpdg	$\frac{кг}{м^3}$	0,275

Продовження табл. 3.1

Теплоємність продуктів згорання на виході печі	c_{dg}^{out}	Cdg_in	$\frac{Дж}{кг \cdot K}$	1321
Коефіцієнт співвідношення паливо/повітря	α	alpha	-	1,1
Теплоємність продуктів згорання на виході топки	c_{dg}^T	Cdg	$\frac{Дж}{кг \cdot K}$	1112
Масова витрата паливного газу	G	Bm	$\frac{кг}{с}$	0,0161
Кількість продуктів згорання на 1 кг паливного газу	G_{dg}	Mdg	-	19,05
Теплотворна здатність паливного газу	q_g^h	q_dH	$\frac{Дж}{кг}$	$4,956 \cdot 10^7$
Ступінь чорноти поверхні стінки газоходу	ε_c	Eps_c	-	0,85
Коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла	C_0	C0	$Вт/(м^2 \cdot K^4)$	5,67
Ступінь чорноти димових газів при середній температурі газу	ε_{dg}	Eps_dk	-	0,171
Поглинаюча здатність газу при температурі поверхні T_{sdk}	A_{dg}	Adk	-	0,37
Маса димового каналу	M_{dk}	Mdk	кг	$2,239 \cdot 10^3$
Теплоємність стінки	c_{dk}	Cdk	$\frac{Дж}{кг \cdot K}$	460
Коефіцієнт, який враховує розподіл тепла в топці від факела	Ψ	Psi	-	1,2

Розрахунок параметрів моделей (2.6), (2.11), (2.17), (2.37), (2.40) здійснений за допомогою програмного забезпечення створеного в середовищі MatLab. Тому в таблиці 3.1 в колонці «Машинна змінна» наведені позначення відповідних величин, які використані при обчисленнях.

Статичний режим роботи нагрівача зумовлює незмінність в часі, температури нафти на виході нагрівача T_n^{out} температури змішувача T_{sz} , по якому тече нафта, температури проміжного теплоносія T_w , температури

димових газів T_{dg}^{out} , температури стінки димових газів T_{sdk} , які визначають стан об'єкта (нагрівача).

Умова незмінності температур T_n^{out} , T_{sz} , T_w , T_{dg}^{out} , T_{sdk} приводить до такої системи нелінійних алгебраїчних рівнянь:

$$-k_{n,1}G_{n0}(T_{n0}^{out} - T_{n0}^{in}) + k_{n,2}T_{sz0} = 0, \quad (3.1)$$

$$k_{wcp}T_{w0} + 0,5k_{ncp}(T_{n0}^{in} + T_{n0}^{out}) - T_{sz0} = 0, \quad (3.2)$$

$$k_{sdk}T_{sdk0} + k_{sz}T_{sz0} - T_{w0} = 0, \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} & (k_5 - k_1(T_{dg0}^{out} - 273))\beta_g(U_0) - \\ & - \left(k_2 \left(0,5(T_{ct}^{max} + T_{dg0}^{out}) \right)^4 - k_3 T_{sdk0}^4 \right) - k_4 \left(0,5(T_{ct}^{max} + T_{dg0}^{out}) - T_{sdk0} \right)^{5/4} = 0, \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} & 0,5 \cdot 10^{-8} \Psi(\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left(\varepsilon_{dg} \left(0,5(T_{ct}^{max} + T_{dg0}^{out}) \right)^4 - A_{dg} T_{sdk0}^4 \right) + \\ & + k_{dg} F_{dk} \left(0,5(T_{ct}^{max} + T_{dg0}^{out}) - T_{sdk0} \right)^{5/4} - C_{sdk}^w F_{dk} (T_{sdk0} - T_{w0}) = 0, \end{aligned} \quad (3.5)$$

яка отримана із рівнянь (2.6), (2.11), (2.17), (2.37), (2.40) шляхом прирівнювання відповідних похідних до нуля.

У математичній моделі (2.37) $\beta_g(U)$ - статична характеристика виконавчого механізму, яка характеризує витрату паливного газу через регулюючий орган в залежності від степені його відкриття.

Була вибрана лінійна залежність $\beta_g(U)$ (рис. 3.1), яка описується такою формулою: β_g

$$\beta_g(U) = a_0 + a_1 U.$$

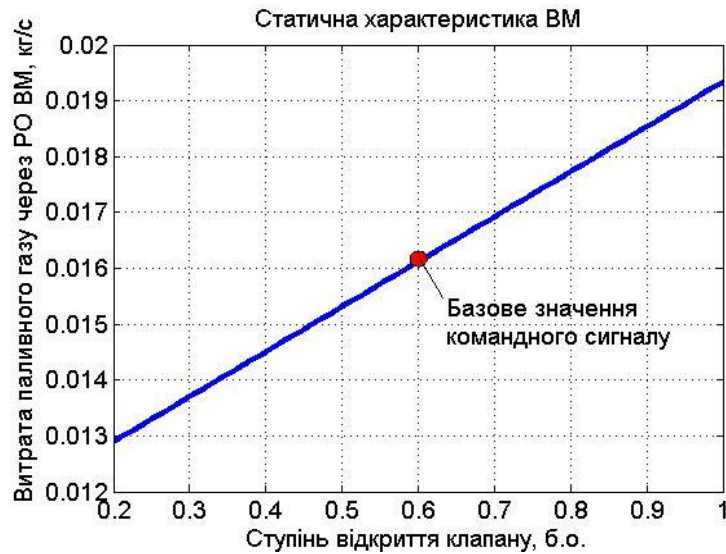


Рисунок 3.1 - Статична характеристика виконавчого механізму

Коефіцієнти a_0 і a_1 обчислені за умови [44], що виконавчий механізм забезпечує витрату паливного газу в діапазоні $G \in [G_{\min}; G_{\max}]$, де $G_{\min} = 0,0129 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$; $G_{\max} = 0,0193 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$, а ступінь відкриття регулюючого органу $U \in [0,2; 1,0]$. Виходячи із наведених значень G і U , отримали такі значення коефіцієнтів: $a_0 = 0,0113$; $a_1 = 0,00806$.

Початкова температура нафти T_{n0}^{in} на вході в нагрівач – незалежна величина і зумовлена технологічними режимами роботи установок, через які протікає нафтова суміш від свердловини до шляхового нагрівача. Було взято - $T_{n0}^{\text{in}} = 288^\circ \text{K}$.

Аналіз рівнянь (3.1) – (3.5) показує, що для розрахунку значень температур T_{n0}^{out} , T_{sz0} , T_{dg0}^{out} , T_{sdk0} , необхідно визначити ряд теплофізичних показників, які характеризують процес горіння.

Визначимо кількість повітря, яке необхідне для спалювання 1 кг природного газу.

Процес горіння протікає за наявності горючої речовини (природного газу), кисню повітря та при певній температурі.

Для того, щоб горіння мало місце, необхідна визначена кількість окиснювача – кисню, який міститься в атмосферному повітрі. Необхідну кількість атмосферного повітря, яка витрачається на повне згорання 1 кг природного газу обчислюють [46] за такою формулою:

$$L_0 = \frac{1}{0,232} \left(\frac{8}{3} m_{fC} + 8m_{fH} + m_{fS} - m_{fO} \right), \quad (3.6)$$

де m_{fC} , m_{fH} , m_{fS} , m_{fO} – масові частки вуглецю, водню, сірки і кисню.

У таблиці 3.2 наведені дані [47] щодо масових часток вуглецю, водню, сірки і кисню, які вміщує природний газ.

Таблиця 3.2 - Масові частки компонентів природного газу

Масові частки компонентів природного газу			
Вуглецю, m_{fC}	Водню, m_{fH}	Сірки, m_{fS}	Кисню, m_{fO}
0,77	0,22	0,01	-

Проведені обчислення за формулою (3.6) дали такий результат:

$$L_0 = 16,4799 \text{ кг/кг}.$$

У топці паливний газ спалюють при певному надлишку повітря. Тоді фактична витрата повітря, яка витрачається на спалювання 1 кг палива, буде такою:

$$L = \alpha L_0,$$

де α - коефіцієнт надлишку повітря.

Допускають [42], що $\alpha = 1,1$. З врахуванням значення α , фактична витрата повітря на 1 кг паливного газу буде такою:

$$L = 18,1279 \text{ кг/кг}$$

Знаючи L_0 , можна визначити кількість продуктів згорання [37], яка утворилась при спалюванні 1 кг паливного газу

$$G_{dg} = 1 + \alpha L_0.$$

З врахуванням значення L_0 , маємо

$$G_{dg} = 19,1279 \text{ кг/кг}.$$

Визначимо нижню теплоту згорання q_g^h паливного газу. Допустимо, що паливний газ складається з таких компонентів – метан, етан, пропан і бутан.

У таблиці 3.3 наведені дані, які необхідні для нижньої теплоти згорання.

Таблиця 3.3 - Вихідні дані для розрахунку нижньої теплоти згорання

Складові паливного газу	Теплота згорання, $q_{g,i}^h, \text{кДж/кг}$	Молярна маса, c_i
метан	50010	0,94
етан	47490	0,02
пропан	46350	0,15
бутан	45716	0,02

Нижню теплоту згорання паливного газу обчислили за такою формулою:

$$q_g^h = \sum_{i=1}^n c_i q_{g,i}^h. \quad (3.7)$$

Використання даних, наведені в табл. 3.3, дає змогу обчислити за формулою (3.7) нижню теплоту згорання паливного газу в топці нагрівача:

$$q_g^h = 4,9569 \cdot 10^4, \text{кДж/кг}.$$

Обчислимо коефіцієнт теплопередачі C_w^{cz} від води до стінки зміювика (табл. 3.1). Для цього скористаємося рівнянням статички (3.1), попередньо врахувавши коефіцієнт $k_{n,1}$. У результаті отримали

$$-G_{n0} c_n \Delta T_n + C_{sz}^n F_z \Delta T_{sz} = 0, \quad (3.8)$$

де $\Delta T_n = T_{mp}^n - T_n^{in}$, $\Delta T_{sz} = T_{mp}^n - T_{sz}$, T_{mp}^n - середня температура нафтової емульсії [48] («робоча точка»).

Із рівняння (3.8) знайшли

$$C_{sz}^n = G_{n0} \frac{c_n \Delta T_n}{F_z \Delta T_{sz}}.$$

За даними, що вміщує табл. 3.1, обчислили

$$C_{sz}^n = 562, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{К}}.$$

Рівняння статистики (3.5) дає змогу визначити коефіцієнт теплопередачі C_{sdk}^w від стінки димового каналу до води. Із рівняння (3.5) випливає, що

$$Q_{sdk} - C_{sdk}^w F_{dk} \Delta T_{sdk} = 0. \quad (3.9)$$

У рівнянні (3.9) Q_{sdk} - тепло, яке передається димовому каналу від димових газів.

Як випливає із рівняння (3.5) складова Q_{sdk} у виразі (3.9) визначається таким виразом:

$$Q_{sdk} = 0,5 \cdot 10^{-8} \psi(\epsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left(\epsilon_{dg} \left(0,5 (T_{ct}^{max} + T_{dg0}^{out}) \right)^4 - A_{dg} T_{sdk0}^4 \right) + \\ + k_{dg} F_{dk} \left(0,5 (T_{ct}^{max} + T_{dg0}^{out}) - T_{sdk0} \right)^{5/4}.$$

Із рівняння (3.9) визначили

$$C_{sdk}^w = \frac{Q_{sdk}}{F_{dk} \Delta T_{sdk}},$$

де ΔT_{sdk} - відхилення температури стінки димового каналу від робочої точки.

Проведені розрахунки на основі даних табл. 3.1 дали змогу отримати такий результат:

$$C_{sdk}^w = 502, \frac{Bm}{m^2 \cdot K}.$$

Інші теплофізичні параметри, що занесені в табл. 3.1 взяті із довідникової літератури [49].

3.2. Розрахунок параметрів і дослідження динамічних властивостей нагрівача нафти як об'єкта автоматичного керування

Розрахунок параметрів математичної моделі нагрівника, яка визначена системою диференціальних рівнянь (2.6), (2.11), (2.17), (2.37) і (2.40), здійснений за допомогою програми, розробленої в середовищі MatLab (додаток А). Результати розрахунків вміщує таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри нелінійних моделей

Назва параметру	Формула	Машинна змінна	Розмірність	Числове значення
Нелінійна модель - 1 (для нафти)				
Постійна часу	$\tau_n = \frac{M_n \cdot c_n}{C_{sz-n} F_z}$	tau_n	с	76.3815
Коефіцієнт передачі	$k_{n,1} = \frac{c_n}{C_{sz-n} F_z}$	Kn1	с/кг	0.0143
Лінійна модель - 2 (стінка-нафта)				
Постійна часу	$\tau_{sz} = \frac{M_z \cdot c_z}{(C_{w_sz} + C_{sz-n}) F_z}$	tau_sz	с	19.6485
Коефіцієнт передачі	$k_{wcp} = \frac{C_{w_sz}}{C_{w_sz} + C_{sz-n}};$	Kw	Б.о.	0.2374
Коефіцієнт передачі	$k_{ncp} = \frac{C_{sz-n}}{C_{w_sz} + C_{sz-n}};$	Kn	Б.о.	0.7626
Лінійна модель - 3 (вода)				
Постійна часу	$\tau_w = \frac{M_w \cdot c_w}{C_{sdk_w} \cdot F_{dk} + C_{w_sz} F_z}$	tau_w	с	6453.3282
Коефіцієнт передачі	$k_{sdk} = \frac{C_{sdk_w} \cdot F_{dk}}{C_{sdk_w} \cdot F_{dk} + C_{w_sz} F_z}$	Ksdk	Б.о.	0.2327
Коефіцієнт передачі	$k_{sz} = \frac{C_{w_sz} \cdot F_z}{C_{sdk_w} \cdot F_{dk} + C_{w_sz} F_z}.$	Ksz	Б.о.	0.7673
Нелінійна модель – 4 (димові гази)				
Коефіцієнт передачі	$k_1 = C_{dg\uparrow} \cdot B_{\max} (1 + \alpha L_0)$	k1	$\frac{Bm}{K}$	341.2913
Коефіцієнт передачі	$k_2 = 0.5 \cdot 10^{-8} (\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \cdot \varepsilon_{dg}$	k2	$\frac{Bm}{K^4}$	2.5380e-07
Коефіцієнт передачі	$k_3 = 0.5 \cdot 10^{-8} (\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \cdot A_{dg}$	k3	$\frac{Bm}{K^4}$	5.4916e-07
Коефіцієнт передачі	$k_4 = 2.1 \cdot F_{dk}$	k4	m^2	59.8500
Коефіцієнт передачі	$k_5 = B_{\max} \cdot \eta_T \cdot q_g^H$	k5	Bm	4.7908e+05

У розділі 2 отримані лінеаризовані математичні моделі у вигляді передавальних функцій $W_{ij}(s)$, де індекс «i» ідентифікує номер вихідної величин, а індекс «j» визначає номер вхідної величини. Математична модель

нагрівача включає в себе шість передавальних функцій (рис. 2.6). Табл. 3.5 дає змогу ідентифікувати передавальну функцію $W_{ij}(s)$ за її індексами.

Таблиця 3.5 – Індксація передавальних функцій нагрівача

	Назва величин	Позначення	Індекси	
			i	j
Вхідні величини	Температура на вході	θ_n^{in}	-	1
	Витрата нафти на вході	g_n	-	2
	Командний сигнал	u	-	3
Вихідні величини	Температура на виході	θ_n^{out}	1	-
	Температура димових газів	θ_{dg}	2	-

У таблиці 3.5 грецькою буквою θ позначені відхилення відповідних температур з відповідними індексами від їх усталених значень.

Обчислення параметрів передавальних функцій $W_{ij}(s)$, де $i=1, 2; j=1, 2, 3$, виконано за допомогою програмного забезпечення, розробленого в середовищі MatLab (додаток Б). Значення відповідних усталених значень вміщує таблиця 3.6.

Таблиця 3.6 – «Базові» значення величин у лінеаризованій моделі

Назва	Позначення	Машинна змінна	Розмірність	Базове значення
Температура нафти на вході	$T_{n,0}^{(in)}$	Ton_in	град. К	288
Температура нафти на виході	$T_{n,0}^{(out)}$	Ton_out	град. К	315,5
Масова витрата нафти	$G_{n,0}$	G0n	кг/с.	24,2
Температура димових газів на виході	$T_{dg\uparrow,0}$	T0dg	град. К	505,5
Температура стінки димового каналу	$T_{sdk,0}$	T0sdk	град. К	420
Температура води	$T_{w,0}$	T0w	град. К	355.5
Командний сигнал	U_0	U0	-	0,6

З використанням даних, які наведені в табл. 3.1, 3.2 та 3.4 за допомогою програмного забезпечення (додаток В), розробленого в середовищі MatLab, обчислені параметри лінеаризованих моделей (табл. 3.7). Значення параметрів лінеаризованих моделей (2.56) – (2.57), які вміщує таблиця 3.5, є вихідними даними для обчислення числових значень параметрів передавальних функцій $W_{ij}(s)$, де $i = 1, 2$; $j = 1, 2, 3$ (рис. 2.6).

Таблиця 3.7 – Параметри лінеаризованих моделей

Назва	Позначення	Машинна змінна	Розмірність	Значення
Лінеаризована модель - 1				
Постійна часу	τ_n	tau_n	с	76.3815
Коефіцієнт	$k_{\theta n}$	kt_n1=- kt_n2	Б. о.	0.6996
Коефіцієнт	k_g	kg	Кг/(с град. К).	-0.4283
Лінійна модель - 2				
Постійна часу	τ_{sz}	tau_sz	с	19.6485
Коефіцієнт	k_{wcp}	Kw	Б. о.	0.2374
Коефіцієнт	k_{ncp}	Kn	Б. о.	0.7626
Лінійна модель - 3				
Постійна часу	τ_w	tau_w	с	6453.3282
Коефіцієнт	k_{sdk}	Ksdk	1/с	0.2327
Коефіцієнт	k_{sz}	Ksz	Б. о.	0.7673
Лінеаризована модель - 4				
Постійна часу	$\tau_{\theta 1}$	tau_T	с	0.3177
Коефіцієнт	$K_{\theta 1}$	K_T1	Б. о.	0.3660
Коефіцієнт	K_u	K_U	Град. К	1.2078
Лінеаризована модель - 5				
Постійна часу	$\tau_{t,1}$	tau_1	с	73.0783
Коефіцієнт	$K_{t,1}$	Kt1	Б. о.	0.1317
Коефіцієнт	$K_{t,2}$	Kt2	Б. о.	0.9565

Дані таблиці 3.5 використані для обчислення параметрів передавальних функцій. У відповідності з рис. 2.6 таких передавальних функцій є шість (три входи і два виходи).

Обчислення параметрів передавальних функцій здійснено з використанням програмного написаного в середовищі MatLab (додаток В). Результати обчислень вміщують табл. 3.6 і 3.7. Передавальні функції, коефіцієнти яких наведені в табл. 3.6 і 3.7, подані у такому вигляді:

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

Таблиця 3.8 – Параметри передавальних функцій нагрівника відносно вихідної величини (температура нафти на виході) θ_n^{out}

Передавальна $W_{11}(s)$		
i, j	b_j	a_i
0	-5.399e13	1.08e13
1	- 1.777e14	3.574e13
2	- 2.443e13	5.528e12
3	- 1.129e12	3.117e11
4	- 1.902e10	7.863e09
5	-8.372e07	9.646e07
6	5.369e05	5.592e05
7	3625	1303
8	5.007	1
Передавальна функція $W_{12}(s)$		
0	-1.009e10	1.08e13
1	- 3.318e10	3.574e13
2	- 4.437e09	5.528e12
3	- 2.096e08	3.117e11
4	- 4.118e06	7.863e09
5	- 3.443e04	9.646e07
6	- 104.7	5.592e05
7	- 6.1034	1303
8	-	1
Передавальна функція $W_{13}(s)$		
0	4.152e04	1.08e13
1	2868	3.574e13
2	38.68	5.528e12

Продовження табл. 3.8

3	7.748	3.117e11
4	-	7.863e09
5	-	9.646e07
6	-	5.592e05
7	-	1303
8	-	1

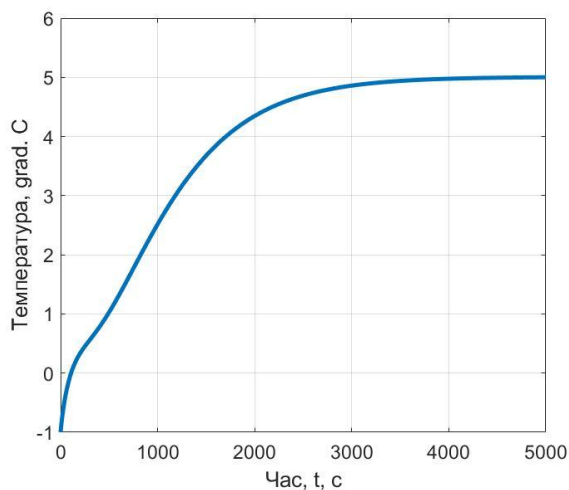
Таблиця 3.9 – Параметри передавальних функцій нагрівника відносно вихідної величини θ_{dg} (температура димових газів)

Передавальна $W_{21}(s)$		
i, j	b_j	a_i
0	-6.984e06	1.08e13
1	- 4.396e05	3.574e13
2	1.434	5.528e12
3	91.43	3.117e11
4	2.499	7.863e09
5		9.646e07
6		5.592e05
7		1303
8		1
Передавальна функція $W_{22}(s)$		
0	-1.02e04	1.08e13
1	- 704.6	3.574e13
2	- 9.504	5.528e12
3	-0.1904	3.117e11
4	-	7.863e09
5	-	9.646e07
6	-	5.592e05
7	-	1303
8	-	1
Передавальна функція $W_{23}(s)$		
0	6.949e13	1.08e13
1	1.114e13	3.574e13
2	6.383e11	5.528e12
3	1.633e10	3.117e11

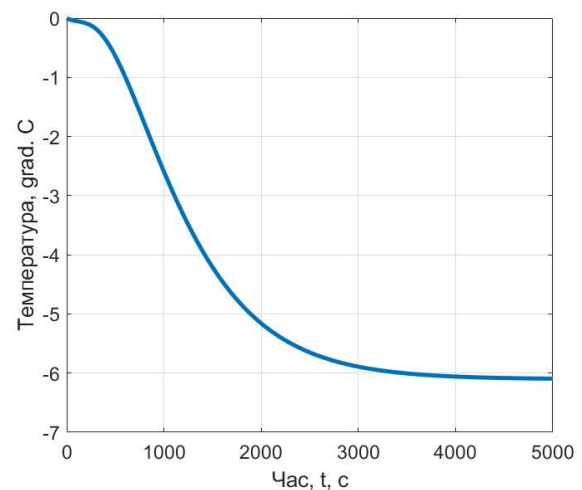
Продовження табл. 3.9

4	2.031e08	7.863e09
5	1.193e06	9.646e07
6	2818	5.592e05
7	2.202	1303
8	-	1

Для якісної оцінки динамічних властивостей непрямого нагрівача побудували графіки перехідних процесів при стрибкоподібних змінах вхідних величин. Вхідні величини збільшували на 10% від їх усталених значень. Графіки перехідних процесів за відповідними каналами передачі величин з входу на вихід зображені на рис. 3.2 – 3.4. Для побудови графіків використаний програмний код, розроблений в середовищі MatLab.

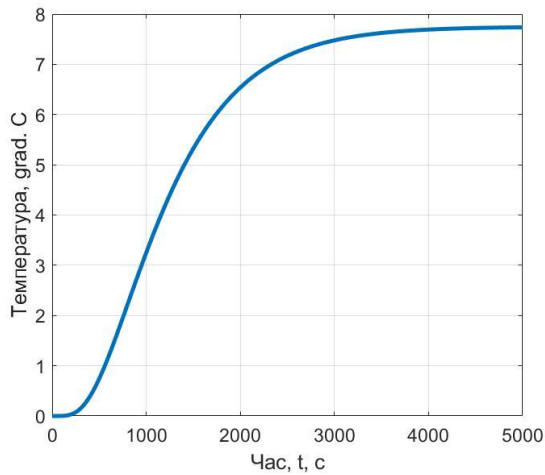


а)

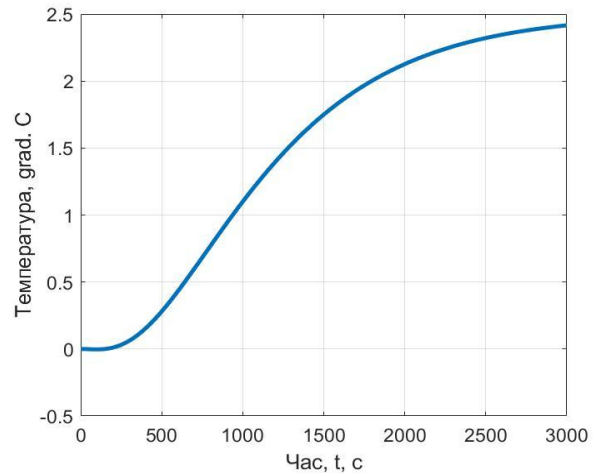


б)

Рисунок 3.2 - Графіки перехідних процесів по каналах: а) «температура на вході» - «температура на виході нагрівача»; б) «витрата нафти» - «температура на виході нагрівача»

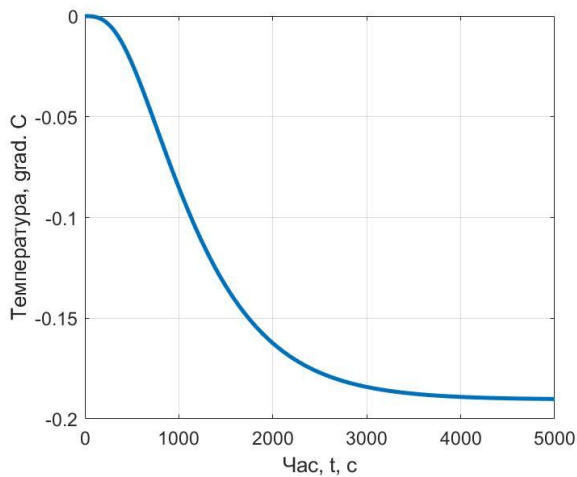


а)

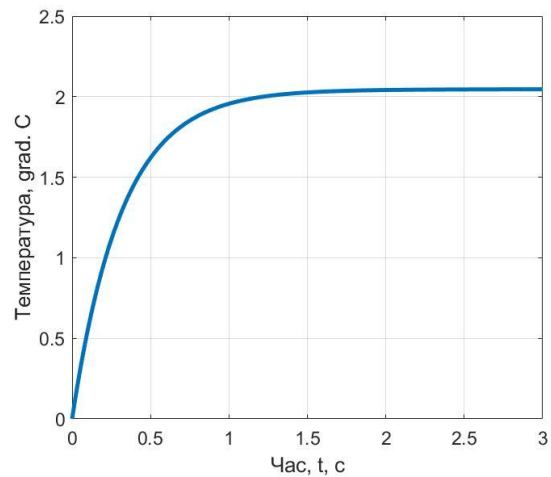


б)

Рисунок 3.3 - Графіки перехідних процесів по каналах: а) «командний сигнал» - «температура на виході нагрівача»; б) «температура на вході» - «температура димових газів»



а)



б)

Рисунок 3.4 - Графіки перехідних процесів по каналах: а) «витрата нафти» - «температура димових газів»; б) «командний сигнал» - «температура димових газів»

Аналіз перехідних процесів, які мають місце при дії вхідних величин (рис. 2.6), дає підстави стверджувати, що шляховий нагрівач з проміжним теплоносієм як об'єкт автоматичного керування є стійкою системою.

Як випливає із рис. 3.4а при зміні температури вхідного продукту спочатку відбувається падіння температури на виході (зменшення температури відносно усталеного значення T_{n0}^{out}), а потім температура зростає внаслідок відбору тепла від проміжного теплоносія.

Графіки 3.2б і 3.4а показують, що збільшення витрати нафти, яка поступає в нагрівач, спричиняє як зменшення температури вхідного продукту, так і падіння температури димових газів внаслідок відбору тепла теплоносієм від димових газів.

Рис. 3.3а, 3.3б і 3.4б демонструють реакцію нагрівача на зміни командного сигналу u та температури нафти на вході θ_n^{in} . Внаслідок таких змін відбувається зростання температури на виході нагрівача (рис. 3.3а) і збільшення температури димових газів (рис. 3.3б і 3.4а).

Аналіз тривалості перехідних процесів показує, що за всіма каналами передачі вхідних впливів (крім каналу «командний сигнал» - «температура димових газів») об'єкт керування має значну інерційність.

За каналами передачі «температура на вході» - «температура на виході нагрівача» і «температура на виході» (рис. 3.2а, 3.3б і 3.4а) тривалість перехідного процесу становить ~ 5000 с.

Дещо меншою інерційністю володіють канали «витрата нафти» - «температура на виході нагрівача» (рис. 3.2б) і «командний сигнал» - «температура на виході нагрівача» (рис. 3.3а). Для першого із них тривалість перехідного процесу складає ~ 1000 с., а для другого - ~ 3000 с.

Найменшу інерційність має канал (рис. 3.4б) «командний сигнал» - «температура на виході нагрівача». Тривалість перехідного процесу за цим каналом ~ 2 с.

Таким чином, встановлено, що нагрівач нафти як об'єкт керування, є стійкою системою та має значну інерційність, що вимагає нових схемотехнічних рішень при проєктуванні ефективних систем керування процесом нагріву нафти у нагрівач з проміжним теплоносієм.

3.3. Спрощення (редукція) лінеаризованої математичної моделі нагрівача нафти

Аналіз отриманих передавальних функцій (табл. 3.6), (3.7) показав, що їх характеристичні рівняння мають восьмий порядок.

Високий порядок передавальних функцій $W_{ij}(s)$ шляхового нагрівника нафти значно ускладнює синтез системи автоматичного керування і подальшу практичну реалізацію такої системи на промислових контролерах. Тому доцільно передавальні функції $W_{ij}(s)$ апроксимувати передавальними функціями нижчого порядку [44].

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 [48, 50].

Числа Генкеля обчислюють за такою формулою [48]:

$$\sigma_i = \sqrt{\lambda_i(PQ)}, \quad (3.10)$$

де P - матриця досяжності Грама;

Q - матриця спостережливості Грама.

У формулі (3.10) λ_i - власні значення матриці PQ , які обчислюються як корені рівняння

$$\det|PQ - \lambda I| = 0,$$

де I - одинична матриця.

Нехай об'єкт (система) представлений матричним диференціальним рівнянням

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = A\bar{x}(t) + B\bar{u}(t),$$

$$\bar{y}(t) = C\bar{x}(t),$$

з початковою умовою: $\bar{x}(t_0) = \bar{x}^{(0)}$.

Тоді матрицю досяжності P обчислюють за такою формулою:

$$P = \int_0^{\infty} \Phi(t) B B^T \Phi(t) dt,$$

а матриця спостережливості є такою:

$$Q = \int_0^{\infty} \Phi(t) C^T C \Phi(t) dt.$$

Фундаментальна матриця $\Phi(t)$ визначає розв'язок матричного рівняння [51]

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = A\bar{x}(t), \quad (3.11)$$

$$\bar{x}(t_0) = \bar{x}^{(0)}, \quad (3.12)$$

де A - матриця розміром $n \times n$;

$\bar{x}(t)$ - вектор стану об'єкта розмірністю n .

Розв'язок рівняння (3.11) з початковою умовою (3.12) є таким [51]:

$$\bar{x}(t) = \Phi(t) \bar{x}^{(0)}. \quad (3.13)$$

У формулі (3.13) фундаментальна матриця $\Phi(t)$ є такою:

$$\Phi(t) = e^{At}.$$

Метод, в основі якого покладені сингулярні числа Генкеля (3.10), дає змогу побудувати діаграму, яка показує розподіл енергії за станами. Кількість домінуючих частот на діаграмі визначають порядок редукованої моделі.

Отже, якщо лінійна (лінеаризована) модель системи або об'єкта подана у вигляді передавальної функції, то у відповідність її можна представити таке диференціальне рівняння:

$$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^i y(t)}{dt^i} = \sum_{j=0}^n b_j \frac{d^j u(t)}{dt^j}. \quad (3.14)$$

У рівнянні (3.14) похідні, які розміщені у лівій і правій частинах мають однаковий порядок n . У тому випадку, коли $m < n$, де m порядок похідної за змінною $u(t)$, коефіцієнти $b_{m+1}, b_{m+2}, \dots, b_n$ прирівнюються до нуля.

Рівнянню (3.14) ставиться у відповідність система диференціальних рівнянь [52], кожне із яких є диференціальним рівнянням першого порядку, тобто

$$\frac{dx_{i-1}(t)}{dt} = x_i(t) + \beta_{i-1}u(t), \quad i = \overline{2, n}, \quad (3.15)$$

$$\frac{dx_n(t)}{dt} = -\frac{1}{a_n} \sum_{j=1}^n a_{j-1}x_j(t) + \beta_n u(t), \quad (3.16)$$

$$y(t) = x_1(t) + \beta_0 u(t). \quad (3.17)$$

Невідомі величини β_i , $i = \overline{0, n}$, обчислюють як розв'язок матричного рівняння $A\bar{\beta} = \bar{b}$, тобто

$$\bar{\beta} = A^{-1}\bar{b},$$

$$\text{де } A = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & \cdots & a_{n-1} & a_n \\ a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_n & 0 \\ a_2 & a_3 & a_4 & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n-1} & a_n & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ a_n & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \cdots \\ \beta_n \end{bmatrix}, \quad \bar{b} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \cdots \\ b_n \end{bmatrix}.$$

Метод Генкеля дає змогу із системи рівнянь (3.15) і (3.16) вичленити ті змінні стану, які мають найменшу енергію. Нехай таких змінних стану буде n_h . Тоді для опису редукованої моделі у (3.15) і (3.16) необхідно n замінити на n_h . У результаті отримаємо редуковану модель, яка у матричній формі, матиме такий вигляд:

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = A_h \bar{x}(t) + \bar{b}_h u(t), \quad (3.18)$$

$$y(t) = \bar{c}^T \bar{x}(t) + \beta_0 u(t), \quad (3.19)$$

де $\bar{x}(t)$ - вектор розмірності n_h , компоненти якого змінні стану об'єкта (системи); $y(t)$ - вихід об'єкта (системи);

$$A_h = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{a_o}{a_{n_h}} & -\frac{a_1}{a_{n_h}} & -\frac{a_2}{a_{n_h}} & \dots & -\frac{a_{n_h-1}}{a_{n_h}} \end{bmatrix} \text{-матриця розміром } n_h \times n_h; \quad \bar{b} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_{n_h} \end{bmatrix} \quad \text{і}$$

$$\bar{c} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \text{-вектори розмірністю } n_h \times 1; \quad \bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n_h} \end{bmatrix} \text{- вектор станів розмірністю } n_h \times 1$$

редукованої моделі.

Для переходу від редукованої моделі (3.18) і (3.19), яка описує динамічні властивості об'єкта (системи) у просторі станів, до передавальної функції $W_{ij}^{(r)}(s)$ необхідно рівняння (3.18) і (3.19) перетворити за Лапасом при нульових початкових умовах. Таке перетворення дало такий результат:

$$s\bar{X}(s) = A_h\bar{X}(s) + \bar{b}_h U(s), \quad (3.20)$$

$$Y(s) = \bar{c}^T \bar{X}(s) + \beta_0 U(s). \quad (3.21)$$

Із системи рівнянь (3.20) і (3.21) визначили передавальну функцію редукованої моделі

$$W^{(r)}(s) = \bar{c}^T (sI - A_h)^{-1} \bar{b}_h + \beta_0.$$

Точність апроксимації початкової передавальної функції $W(s)$ редукованою передавальною функцією $W^{(r)}(s)$ оцінювали за максимальною відносною похибкою відхилення редукованої перехідної характеристики $h^{(r)}(t)$ від перехідної характеристики $h(t)$

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

де N_r - ординати перехідних характеристик, обчислених в дискретному часі.

Процес редукції передавальних функцій нагрівача відбувся за допомогою програмного забезпечення створеного в середовищі MatLab (додаток Г). Результати редукції відтворюють табл. 3.10 і 3.11.

Таблиця 3.10 – Параметри передавальних функцій нагрівника після редукції (температура нафти на виході нагрівача)

Передавальна функція $W_{11}(s)$			
i, j	b_j	a_i	Похибка апроксимації, %
0	-2.803e07	2.803e07	5.1001e-01
1	5.347e04	4.034e05	
2	60.88	1153	
3	4.981	1	
Передавальна функція $W_{12}(s)$			
i, j	b_j	a_i	Похибка апроксимації, %
0	-5.5e04	5.144e07	3.8460e-01
1	501.4	4.286e05	
2	- 6.127	1218	
3	-	1	
Передавальна функція $W_{13}(s)$			
i, j	b_j	a_i	Похибка апроксимації, %
0	2.038e04	5.605e07	4.3932e-01
1	- 636	4.413e05	
2	7.782	1232	
3	-	1	

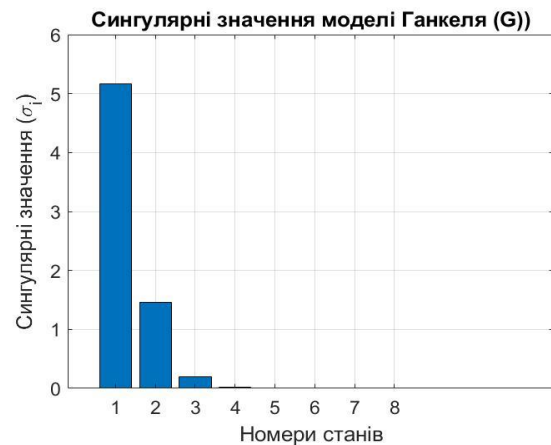
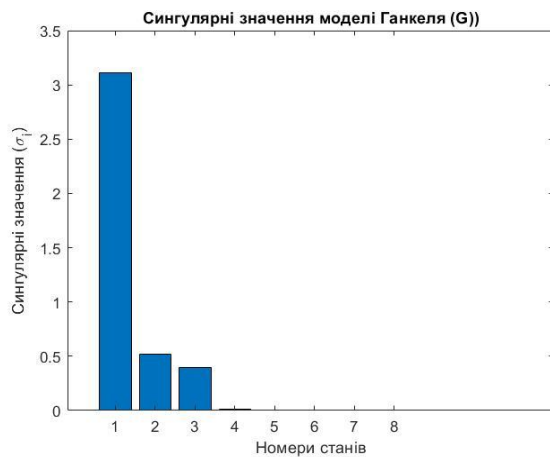
Таблиця 3.11 – Параметри передавальних функцій нагрівника після редукції (температура димових газів)

Передавальна функція $W_{21}(s)$			
i, j	b_j	a_i	Похибка апроксимації, %
0	2231	4.695e07	1.8738e-01
1	- 166.7	4.26e05	

Продовження табл. 3.11

2	2.504	1206	
3		1	
Передавальна функція $W_{22}(s)$			
i, j	b_j	a_i	Похибка апроксимації, %
0	15.89	4.325e05	3.5015
1	- 0.1838	1053	
2		1	
Передавальна функція $W_{23}(s)$			
i, j	b_j	a_i	Похибка апроксимації, %
0	2.044	0.3178	1.0686e-01
1	-	1	

Візуалізація процедури спрощення передавальних функцій нагрівача подана на рис. 3.5 – 3.7, де зображені діаграми Генкеля, які відображають розподіл енергії за станами об'єкта. Вибір порядку передавальної функції здійснювався за кількістю домінуючих станів об'єкта.



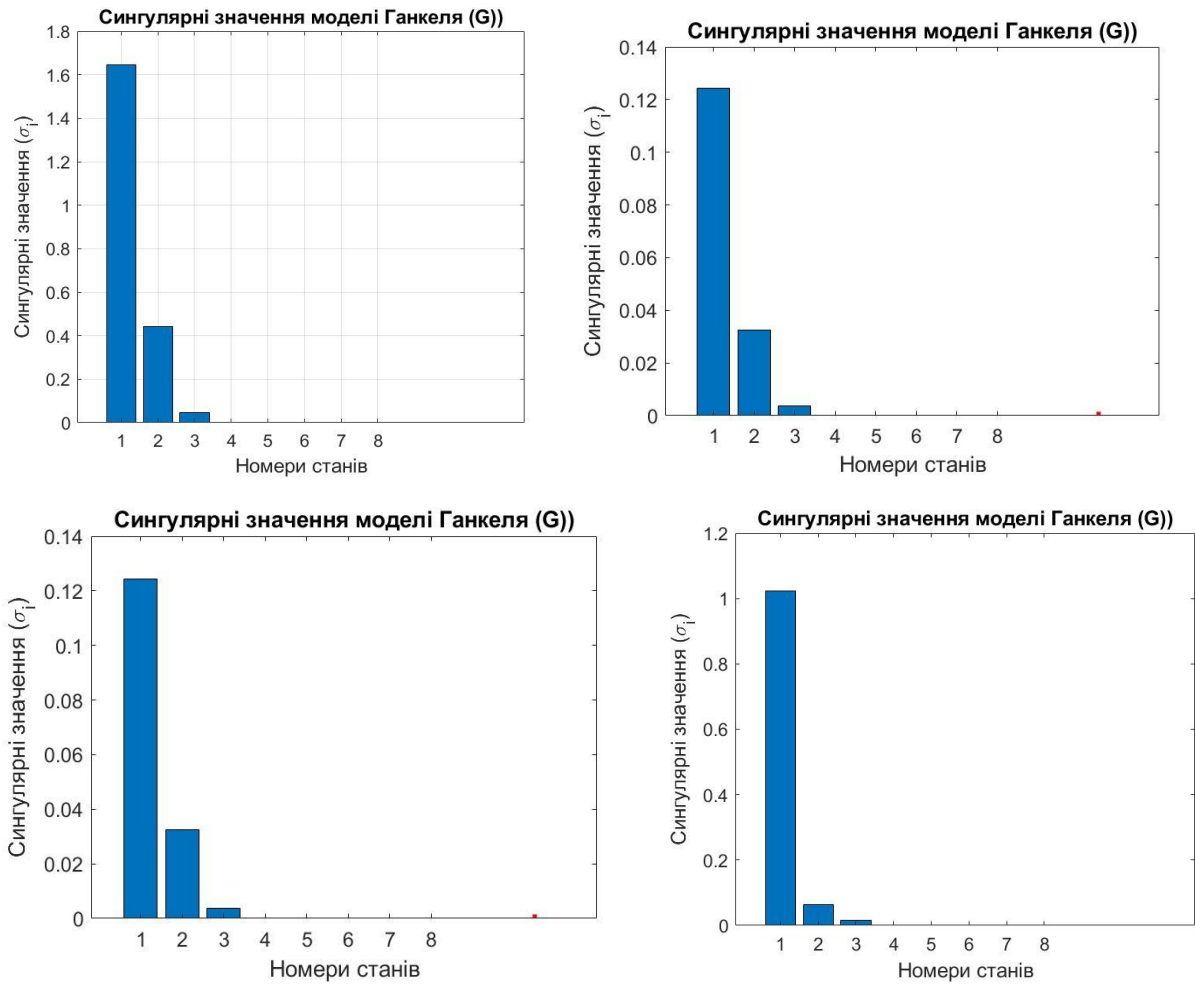
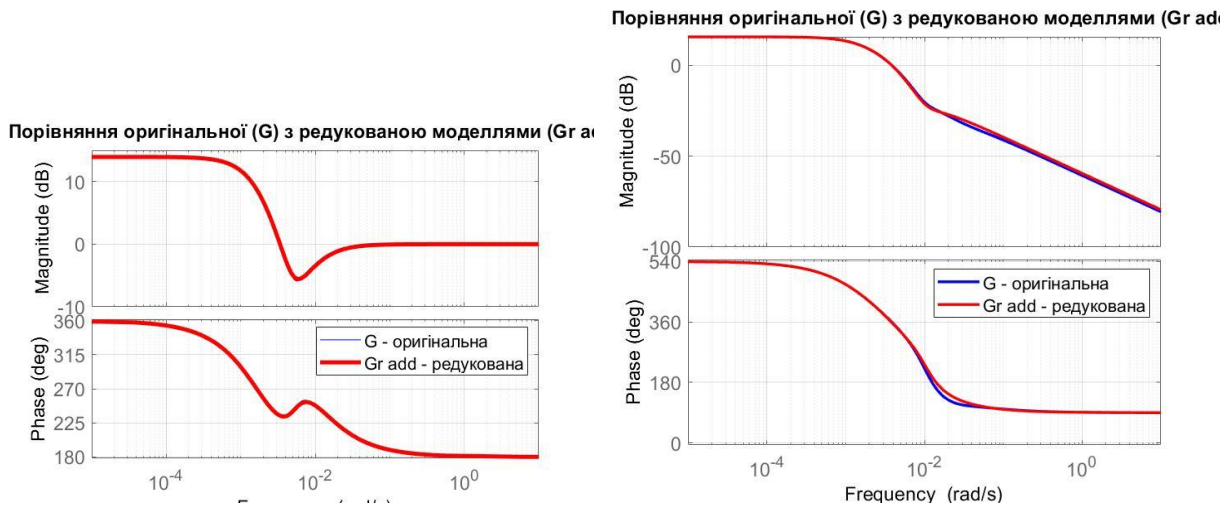


Рисунок 3.5 - Діаграми сингулярних чисел Генкеля



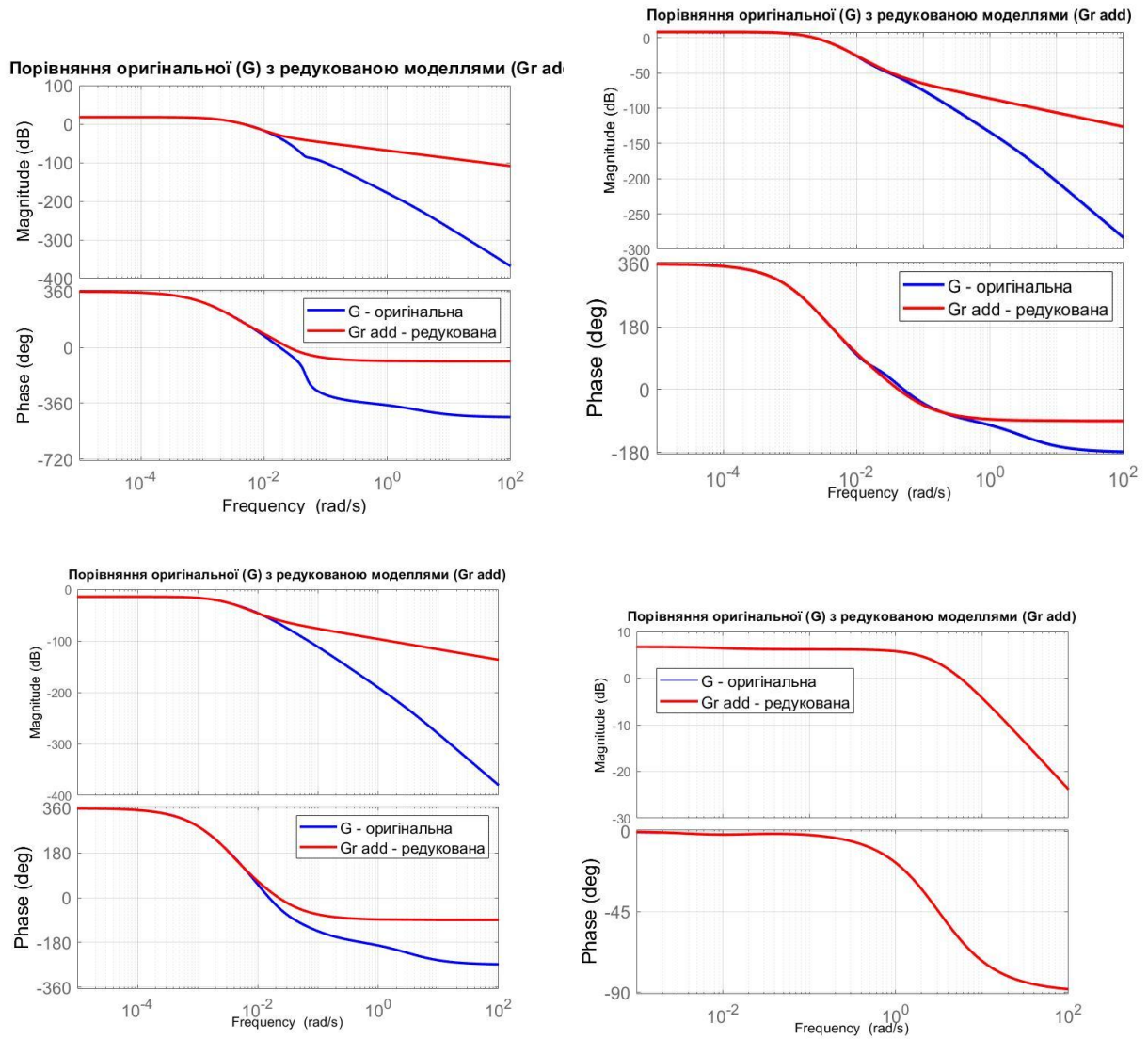
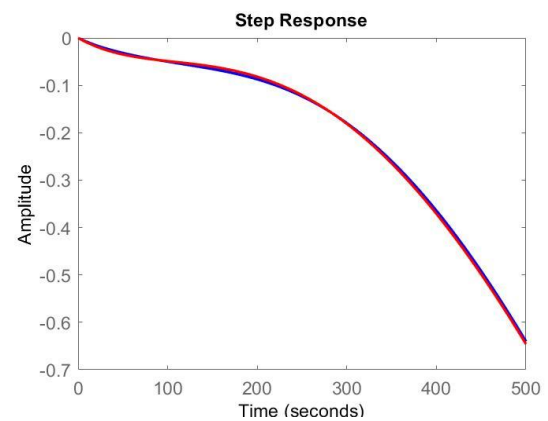
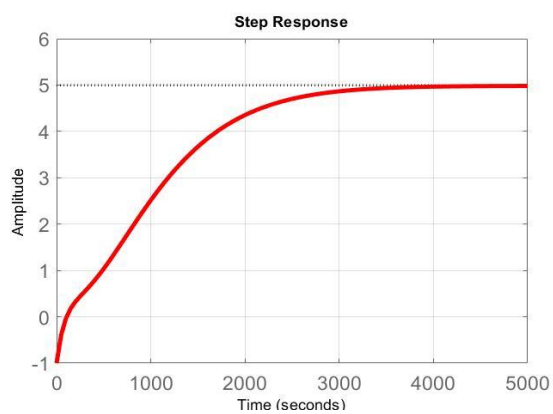


Рисунок 3.6 - Вихідні та редуковані логарифмічні частотні характеристики нагрівача



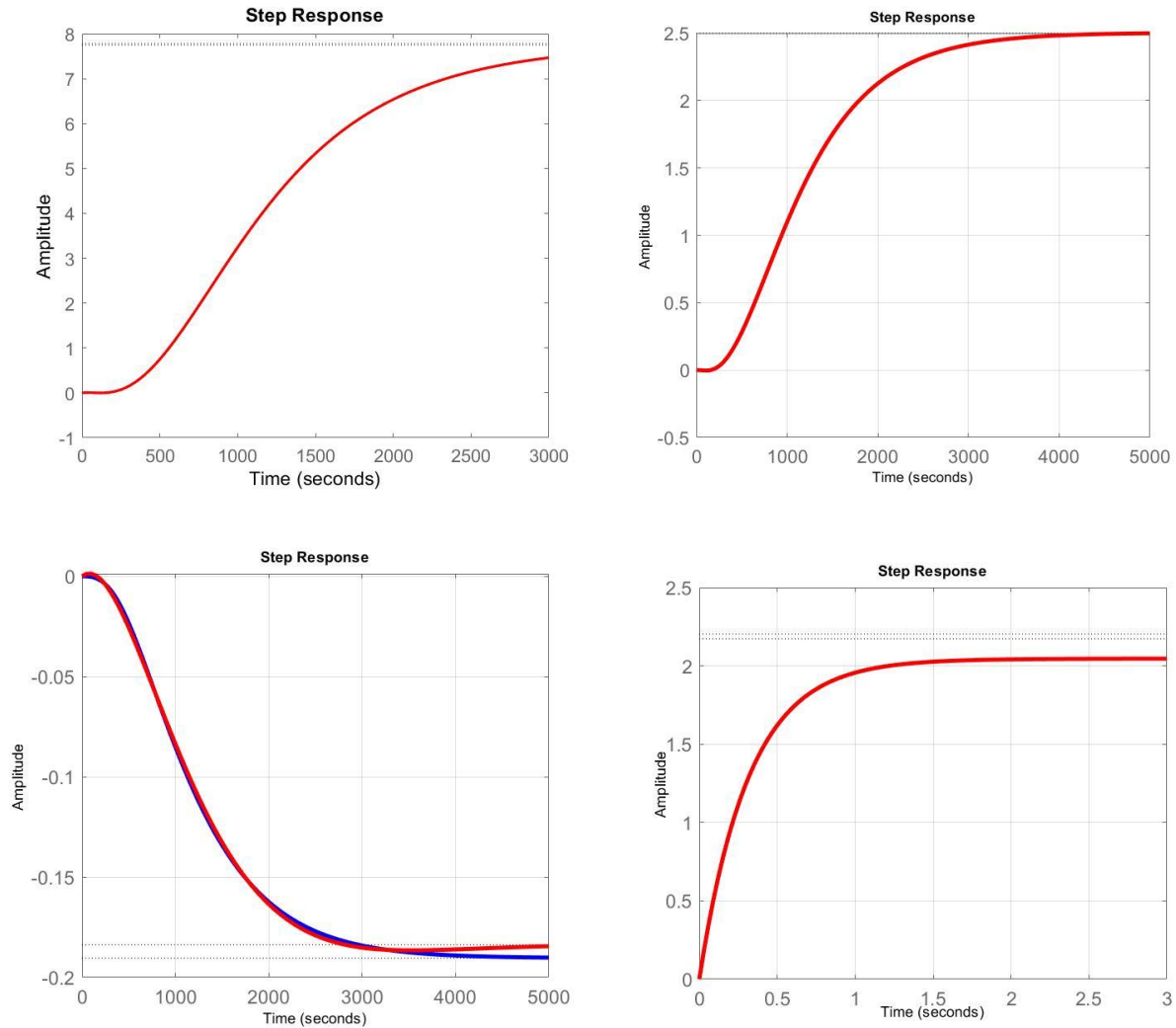


Рисунок 3.7 - Вихідні і редуковані перехідні характеристики нагрівача

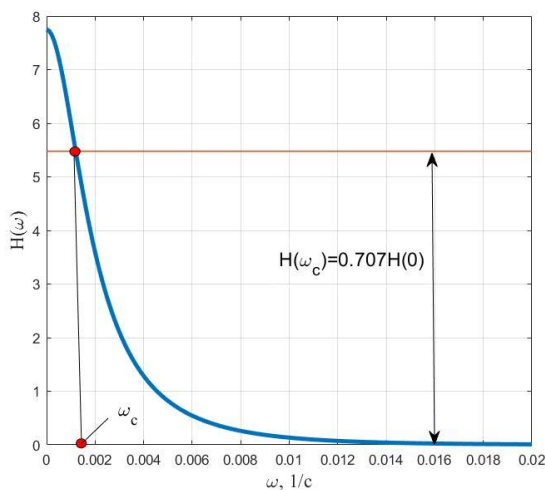
На рис. 3.5 – 3.7 діаграми Генкеля, логарифмічні частотні характеристики і перехідні характеристики розташовані в тому ж порядку, що і передавальні функції в табл. 3.8 і 3.9.

Аналіз отриманих результатів, які відображені в табл. 3.8 і 3.9 та на рис. 3.5 - 3.7, показує, що редукція математичних моделей нагрівача, які представлені передавальними функціями $W_{11}(s)$, $W_{12}(s)$ і $W_{23}(s)$, виконана з достатньою точністю про що свідчать незначні похибки розходжень між вихідними перехідними характеристиками і їх редукованими аналогами. Для вказаних математичних моделей максимальні похибки редукції не перевищують 0,5 %. Крім того у робочому діапазоні частот співпадають і логарифмічні

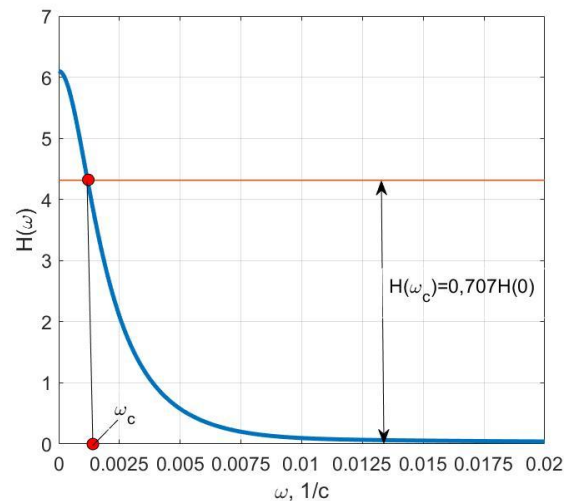
частотні характеристики, які зумовлені передавальними функціями $W_{11}(s)$, $W_{12}(s)$ і $W_{23}(s)$.

Стосовно передавальних функцій $W_{13}(s)$, $W_{21}(s)$ і $W_{22}(s)$ є задовільна збіжність між вихідними і редукованими перехідними характеристиками (похибка апроксимації не перевищує 3.5%), а логарифмічні частотні характеристики з достатньою для практики точністю співпадають в інтервалі низьких частот – верхня межа не перевищує значення 0.2 1/с. Оскільки нагрівач з проміжним теплоносієм має значну інерційність, то він буде нечутливий до частот, які лежать поза діапазоном $\omega \in [0; \omega_c]$, де ω_c – частота, при якій амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) $H(\omega)$ каналу передачі, що характеризується передавальною функцією $W_{ij}(s)$, приймає значення [53] $H(\omega_c) = \sqrt{2}H(0)/2$.

На рис. 3.8 зображені АЧХ $H(\omega)$, які побудовані для передавальних функцій (табл. 3.6 і 3.7) $W_{13}(s)$ і $W_{21}(s)$, а на 3.9 зображена АЧХ для передавальної функції (табл. 3.7) $W_{22}(s)$. Для побудови вказаних частотних характеристик використаний програмний код, розроблений в середовищі MatLab.



а)



б)

Рисунок 3.8 - Амплітудно-частотні характеристики, які побудовані за передавальними функціями $W_{13}(s)$ (а) і $W_{21}(s)$ (б)

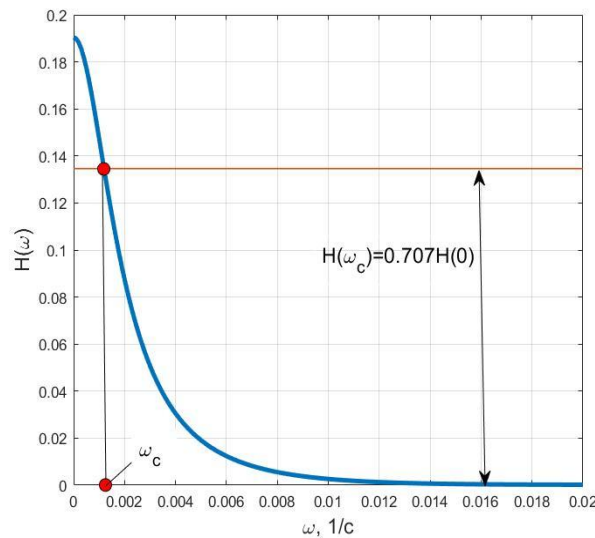


Рисунок 3.9 - Амплітудно-частотна характеристика, яка побудована за передавальною функцією $W_{22}(s)$.

Рис. 3.8 і 3.9 показують, що частота $\omega_c < 10^{-2}$ (рис. 3.6), тобто канали передачі вхідних величин «командний сигнал – температура димових газів», «температура нафти на вході – температура димових газів» та «витрата нафти на вході - температура димових газів», діють як фільтри низьких частот.

Таким чином, виконана редукція передавальних функцій нагрівника нафти з проміжним носієм дала змогу зменшити їх порядки, що значно спрощує синтез системи автоматичного керування процесом нагріву нафти.

Висновки до розділу

1.3 використанням статичного режиму роботи нагрівача нафти з проміжним теплоносієм визначені параметри нелінійних математичних моделей, що є основою для отримання лінеаризованих математичних моделей нагрівача нафти.

2. Встановлені «базові» значення вхідних і вихідних величин, відносно яких здійснений процес лінеаризації, що дало змогу обчислити параметри шести передавальних функцій.

3. Аналіз передавальних функцій показав, що вони мають восьмий порядок. Такий високий порядок передавальних функцій значно ускладнює синтез системи автоматичного керування процесом нагріву нафти. За допомогою методу редукції Генкеля здійснено пониження порядку передавальних функцій з восьми до двох і трьох, що значно спростить процес синтезу автоматичної системи керування температурним режимом нагрівача.

4. Шляхом побудови логарифмічних частотних характеристик і перехідних процесів для кожного із шести каналів передачі вхідних величин показано, що редукція передавальних функцій забезпечує необхідну точність апроксимації вихідних передавальних функцій редукованими передавальними функціями.

РОЗДІЛ 4

СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НАГРІВНИКОМ НАФТИ З ПРОМІЖНИМ ТЕПЛОНОСІЄМ

4.1. Постановка задачі синтезу системи автоматичного керування

Аналіз динамічних властивостей нагрівача нафти з проміжним теплоносієм, виконаний у розд. 3, показав, що нагрівач нафти як об'єкт автоматичного керування має значну інерційність.

Для досягнення бажаних показників якості процесу керування об'єктом з великою інерційністю необхідно розробити структурно-параметричні методи синтезу систем автоматичного керування таким об'єктом.

Суть методу у тому, що вибирається певна структура системи автоматичного керування, виходячи із аналізу динамічних властивостей об'єкта та його структурної схеми.

Структурна схема об'єкта, яка створена на основі його лінеаризованої математичної моделі об'єкта, визначає вхідні та вихідні величини об'єкта та внутрішні зв'язки між вхідними і вихідними величинами.

Відомо, що вхідні величини розділяють на дві групи – керуючі дії і завади. Завади виникають внаслідок взаємодії об'єкта із зовнішнім середовищем.

Після того як визначена структурна схема керованого об'єкта та на цій основі синтезована система автоматичного керування, настає другий етап синтезу системи автоматичного керування – визначення переметрів налаштування регуляторів.

На основі лінеаризованої моделі, яка отримана у розд. 2, синтезована структурна схема нагрівача нафти з проміжним носієм.

Аналіз структурної схеми дав змогу встановити, що динамічні властивості нагрівача нафти характеризуються шістьма передавальними

функціями, які визначають функціональну взаємодію між вхідними і вихідними величинами.

Із структурної схеми (рис. 2.6) випливає, що вхідними величинами є – температура нафти на вході в нагрівача, витрата робочого продукту (нафти) і подача паливного газу в топку нагрівача. Перші дві фізичні величини – збурення, а подача палива в топку нагрівача - це керуюча дія, яка дає змогу цілеспрямовано змінювати температуру нафти (вихідну величину) на виході із нагрівача.

Як показує (рис. 2.6) вихідною величиною є також температура димових газів на виході із топки нагрівача.

Основним каналом, який визначає значення вихідної величини (температури нафти на виході із нагрівача) в залежності від подачі паливного газу у топку нагрівача, є канал «подача паливного газу» - «температура нафти на виході». Цей канал будемо називати основним каналом, динамічні властивості якого визначені передавальною функцією $W_{13}(s)$. У другому розділі показано, що передавальна функція $W_{13}(s)$ має восьмий порядок. Такий високий порядок передавальної функції $W_{13}(s)$ робить її не придатною для синтезу автоматичної системи керування процесом нагрівання нафти.

З метою зменшення порядку передавальної функції $W_{13}(s)$ вона була редукована (табл. 3.8). Внаслідок редукції порядок передавальної функції зменшився з восьми до трьох.

Метод редукції, який використовує сингулярні числа Генкеля, дає змогу отримати передавальні функції, у яких порядок полінома чисельника на одиницю менший за порядок полінома знаменника. Як показали комп'ютерні експерименти при синтезі системи автоматичного керування часто виникає необхідність, щоб порядок полінома чисельника був незалежним від порядку полінома знаменника.

У роботі [54] для редукції моделі запропоновано використовувати метод площ. Метод площ дає змогу за експериментальною кривою розгону визначити структуру і параметри відповідної передавальної функції [55].

Допускаємо, що перехідна характеристика, яка отримана за вихідною передавальною функцією $W_{13}(s)$ (табл. 3.6) є «експериментальною» характеристикою. За значеннями її ординат у фіксовані моменти часу початкову перехідну характеристику апроксимуємо з певною точністю наближеною до неї перехідною характеристикою, якій буде відповідати передавальна функція нижчого порядку у порівнянні з вихідною передавальною функцією $W_{13}(s)$.

Передавальну функцію $W_{13}(s)$ апроксимували передавальною функцією нижчого порядку, яка є такою:

$$W_{13}^a(s) = \frac{\sum_{j=0}^m B_j s^j}{\sum_{i=0}^n A_i s^i}. \quad (4.1)$$

Для фізичних об'єктів виконується умова: $m \leq n$.

Математичну модель перетворимо так, щоб вільні члени поліномів чисельника та знаменника дорівнювали б одиниці, тобто

$$W_{13}^a(s) = k_a \frac{1 + \sum_{j=0}^m b_j s^j}{1 + \sum_{i=0}^n a_i s^i}, \quad (4.2)$$

$$\text{де } k_a = \frac{B_0}{A_0}; \quad b_j = \frac{B_j}{B_0}; \quad a_i = \frac{A_i}{A_0}; \quad j = \overline{1, m}, \quad i = \overline{1, n}.$$

Передавальну функцію $W_{13}^{(n)} = \frac{W_{13}^a(s)}{k_a}$ називають нормованою передавальною функцією. Із (4.2) випливає, що

$$W_{13}^{(n)}(s) = \frac{1 + \sum_{j=0}^m b_j s^j}{1 + \sum_{i=0}^n a_i s^i}. \quad (4.3).$$

Передавальній функції (4.3) відповідає нормована перехідна характеристика $y^{(n)}(t)$. Для порівняння функції $y^{(n)}(t)$ з «експериментальною» перехідною характеристикою $Y(t)$, останню необхідно також нормувати. Нормалізація характеристики $Y(t)$ здійснюється за такою формулою:

$$y^{(n)}(t) = \frac{Y(t)}{Y(t_{Ne})},$$

де Ne - кінцева ордината «експериментальної» кривої.

Нормованій передавальній функції (4.3) відповідає таке диференціальне рівняння:

$$a_0 y^{(n)}(t) + \sum_{i=1}^n \frac{d^i y^{(n)}(t)}{dt^i} = b_0 u(t) + \sum_{i=1}^n \frac{d^i u(t)}{dt^i}. \quad (4.4)$$

Порядки похідних у лівій і правій частинах рівняння (4.4) однакові і дорівнюють n . У тому випадку, коли $m < n$, коефіцієнти $b_n, b_{n-1}, \dots, b_{m+1}$ прирівнюються до нуля.

Після вибору структури передавальної функції (4.3) і переходу до рівняння (4.4), необхідно перейти до системи рівнянь (3.15) – (3.17), яка дає змогу визначити перехідну функцію $y^{(n)}(t)$.

Параметри нормованої передавальної функції (4.3) будемо обчислювати, використовуючи масив даних, отриманих як розв'язок вихідної моделі $W_{13}(s)$.

Визначення параметрів моделі (4.3) ґрунтується [56] на розкладі функції $\frac{1}{W_{13}^{(n)}(s)}$ в ряд Тейлора в околі точки $s = 0$. Результатом такого розкладу є таке співвідношення:

$$\frac{1}{W_{13}^{(n)}(s)} = 1 + F_1 s + F_2 s^2 + F_3 s^3 + \dots, \quad (4.5)$$

Площі k -го порядку F_k обчислюють за такою формулою:

$$\underbrace{\int_0^t \int_0^t \cdots \int_0^t}_{k-\text{раз}} (z_k(\tau) - z(\tau)) \underbrace{d\tau d\tau \dots d\tau}_{k-\text{раз}}, \quad (4.6)$$

Функцію $z_k(\tau)$ визначають на основі функції $W_{zk}(s) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^k a_i s_i}$, а

функція $z(\tau)$ відповідає передавальній функції $\frac{1}{W_z(s)} = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i s_i$.

У виразі (4.5) величину $W_{13}^{(n)}(s)$ замінимо на її значення, яке визначене формулою (4.3). Тоді

$$\frac{1 + \sum_{i=0}^n a_i s^i}{1 + \sum_{j=0}^m b_j s^j} = 1 + F_1 s + F_2 s^2 + F_3 s^3 + \dots \quad (4.7)$$

У виразі (4.7) поліноми чисельника і знаменника мають однакові порядки. Деякі із коефіцієнтів b_j можуть приймати значення нуль.

Прирівнявши у рівнянні (4.7) коефіцієнти при однакових степенях, отримаємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь

$$a_k = \sum_{i=1}^{k-1} b_i F_{k-i} + F_k + b_k, \quad k = \overline{1, N_q}, \quad (4.8)$$

де $N_q = n + m$.

Невідомими величинами в системі рівнянь (4.8) є коефіцієнти передавальної функції (4.3).

Систему рівнянь (4.8) запишемо [57] у матрично-векторній формі

$$A_a \bar{a} = \bar{F}, \quad (4.9)$$

$$\text{де } A_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & -F_1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 & -F_2 & -F_1 & -1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 0 & -F_{k-1} & -F_{k-2} & -F_{k-3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & -F_{N_q-1} & -F_{N_q-2} & -F_{N_q-3} & \dots & -1 \end{bmatrix}, \bar{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \\ b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix}, \bar{F} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \dots \\ F_k \\ \dots \\ F_{N_q} \end{bmatrix}.$$

Вектор $\bar{F}$ шукають як розв'язок матрично-векторного рівняння.

$$M\bar{F} = \bar{\mu}, \quad (4.10)$$

$$\text{де } M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\mu_1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\mu_2 & -\mu_1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\mu_3 & -\mu_2 & -\mu_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\mu_{N-1} & -\mu_{N-2} & -\mu_{N-3} & -\mu_{N-4} & \dots & -\mu_1 & 1 \end{bmatrix}, \bar{F} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ \dots \\ F_{N_q} \end{bmatrix}, \bar{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ \mu_4 \\ \dots \\ \mu_N \end{bmatrix}.$$

Значення величин μ_k з рівняння (4.10) обчислюють [55] за такою формулою:

$$\mu_k = \frac{1}{(k-1)!} \int_0^\infty (-t)^{k-1} \varphi_a(t) dt, \quad k=1,2,\dots, \quad (4.11)$$

$$\varphi_a(t) = 1 - h(t), \quad (4.12)$$

де $h(t)$ -перехідна характеристика, яка відповідає передавальній функції (4.3).

На рис. 4.1 зображений графік функції $\varphi_a(t)$, побудований з використанням «експериментальної» перехідної характеристики.

Обчислення інтегралу (4.11) виконано методом Сімпсона [52] з рівномірним кроком дискретності.

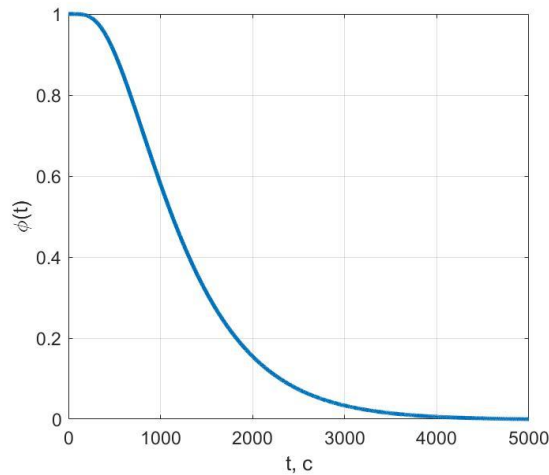


Рисунок 4.1 - Графік залежності $\varphi_a(t)$

Обчисленні значення μ_k дали змогу знайти $\bar{F}$ із формули (4.9)

$$\bar{F} = M^{-1}\bar{\mu}. \quad (4.13)$$

Формула (4.13) дає змогу обчислити параметри нормованої передавальної функції (4.3)

$$\bar{a} = A_a^{-1}\bar{F}. \quad (4.14)$$

Таким чином, обчислення параметрів нормованої передавальної функції (4.3) зводиться до обчислення значення μ_k , а потім значення $\bar{F}$, яке дає змогу визначити параметри $W_{13}^{(n)}(s)$ за формулою (4.14).

Розроблений алгоритм обчислення параметрів нормованої передавальної функції (4.3) є основою програмного забезпечення (додаток Д), за допомогою якого визначені параметри функції $W_{13}^{(n)}(s)$.

У результаті обчислень отримали таку передавальну функцію каналу «командний сигнал-температура нафти на виході нагрівача»:

$$W_{13}^a(s) = \frac{k_a}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}, \quad (4.15)$$

де $k_a = 7,7363$; $a_0 = 5,5791 \cdot 10^5$, $a_1 = 1291,2926$, $a_2 = 1$.

Середньо квадратичне відхилення розрахункових даних від «експериментальних» є таким: $\sigma_y = 3,4263 \cdot 10^{-2}$.

Візуальна оцінка точності виконаної апроксимації здійснена за перехідними характеристиками і логарифмічними частотними характеристиками. Останні побудовані в інтервалі зміни частот, які визначені полосою пропускання (рис. 3.8а).

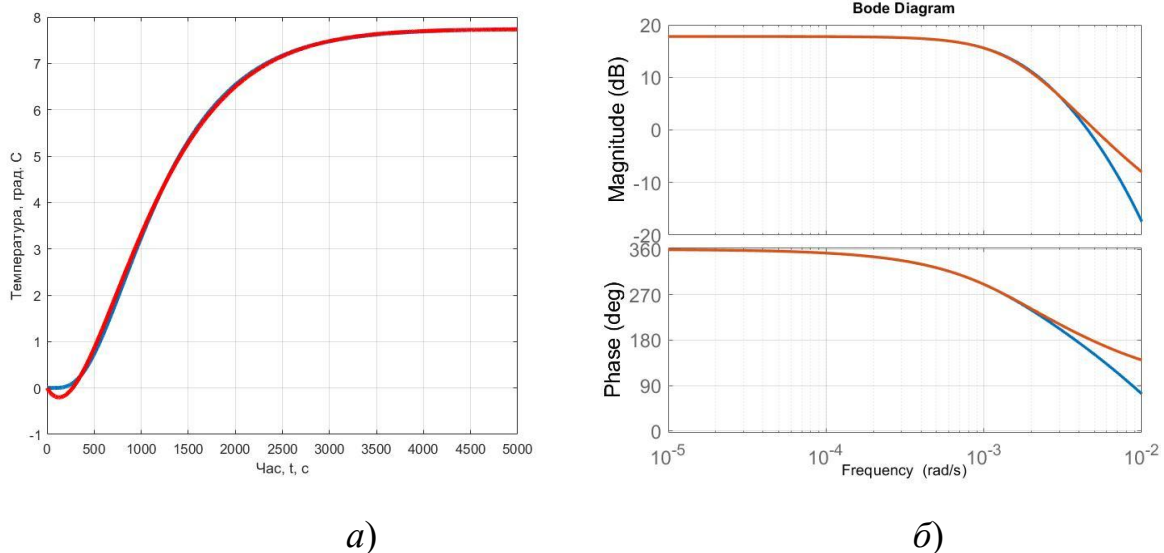


Рисунок 4.2 - Графічна візуалізація результатів апроксимації

Порівняння результатів редукції за методом сингулярних чисел Генкеля і методом площ показує, що редукція за методом площ дала змогу дещо спростити передавальну функцію $W_{13}(s)$ при порівнянній точності апроксимації.

Поставимо задачу: синтезувати систему автоматичного керування процесом нагрівання нафти, в якій основним каналом є «командний сигнал U -температура нафти на виході T_n^{out} » з передавальною функцією (4.15).

Система автоматичного керування повинна забезпечуватиме значне перерегулювання, що виключає появу гарячих ділянок в жаровій трубі. Поява таких ділянок може призвести до деградації металу жарової труби і підвищення ймовірності розривів і аварій.

Оскільки нагрівач непрямого типу з водяною ванною володіє значною інерційністю, то система автоматичного керування повинна забезпечувати прийнятний час тривалості перехідного процесу.

4.2. Одноконтурна система автоматичного керування процесом нагрівання нафти

Одноконтурна система є найпростішим варіантом вирішення задачі синтезу автоматичного керування процесом нагрівання нафти. Вона буде слугувати «базою» порівняння з можливими варіантами синтезованих систем автоматичного керування температурним режимом нагрівача нафти.

На рис. 4.3 зображена одноконтурна система автоматичної стабілізації температури на виході нагрівника нафти. Температура на виході вимірюється термометром опору у комплекті з нормуючим перетворювачем S_1 , вихідний сигнал у якого поступає на елемент порівняння $EП$, де виробляється сигнал неузгодженості $\varepsilon(t) = \theta_{ir} - y$, де θ_{ir} - завдання регулятора Con . У відповідності з ПІ-алгоритмом керування регулятор виробляє керуючу дію u , яка діє на виконавчий пристрій ED , який в свою чергу змінює подачу палива до газового факелу.

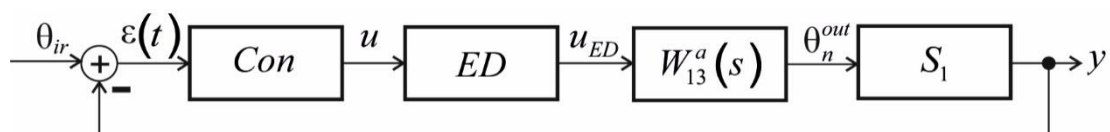


Рисунок 4.3 - Структурно-функціональна одноконтурна система автоматичної стабілізації температури на виході шляхового нагрівача нафти

Оскільки нагрівач по каналу $u_{ED} - \theta_n^{out}$ має значну інерційність, то нехтуємо динамічними властивостями виконавчого пристрою ED і давача температури S_1 .

Таке допущення означає, що $W_{ED}(s) = k_{ED}$ і $W_{s,l}(s) = k_{s,l}$. Передавальна функція регулятора є такою:

$$W_{cn}(s) = \frac{C_0 s + C_1}{s}, \quad (4.16)$$

де C_0 , C_1 - параметри налаштування ПІ-регулятора.

Поставимо таку задачу: знайти параметри налаштування C_0 і C_1 ПІ-регулятора за умови мінімального значення узагальненого квадратичного критерію якості процесу керування, який обчислюється за такою формулою:

$$J = \int_0^{\infty} (\varepsilon^2(t) + \tau^2 \dot{\varepsilon}^2(t)) dt. \quad (4.17)$$

Інтеграл (4.17) обчислюють за коефіцієнтами передавальної функції похибки неузгодженості.

Передавальна функція похибки неузгодженості відносно вхідної величини є такою:

$$W_{y\theta_{ir}}(s) = \frac{1}{1 + W(s)}, \quad (4.18)$$

Передавальна функція розімкненої системи обчислена у відповідності з рис. 4.3

$$W(s) = W_{cn}(s) W_{13}^a(s).$$

Оскільки передавальна функція регулюючого пристрою визначена формулою (4.16), а $W_{13}^a(s)$ - формулою (4.15), то

$$W(s) = \frac{k_s (C_0 s + C_1)}{(a_0 s^2 + a_1 s + a_2) s}. \quad (4.19)$$

З врахуванням значення $W(s)$ формула (4.18) буде такою:

$$W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s) = \frac{(a_0 s^2 + a_1 s + a_2) s}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + (a_2 + k_s C_0) s + k_s C_1}.$$

Інтеграл (4.17) подаймо як суму двох інтегралів

$$J = J_0 + \tau^2 J_1, \quad (4.20)$$

де $J_0 = \int_0^\infty \varepsilon^2(t) dt$, $J_1 = \int_0^\infty \dot{\varepsilon}^2(t) dt$; τ — постійна величина, яка визначає вплив

похідної в формулі (4.17).

Значення J_0 і J_1 можна обчислити [58], якщо відомі зображення за Лапласом похибки неузгодженості та її похідної. При $\theta_{ir} = 1(t)$ будемо мати

$$E(s) = \frac{1}{s} W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s). \text{ Тоді}$$

$$E(s) = \frac{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + (a_2 + k_s C_0) s + k_s C_1}. \quad (4.21)$$

Тепер обчислимо $E_1(s) = sE(s) - \varepsilon(0)$, де $E_1(s) = L[\dot{\varepsilon}(t)]$. Оскільки $\varepsilon(0) = \lim_{s \rightarrow \infty} sE(s)$, то з врахуванням формули (4.21) отримаємо: $\varepsilon(0) = 1$. Отже,

$$E_1(s) = \frac{(a_0 s^2 + a_1 s + a_2)s}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + (a_2 + k_s C_0)s + k_s C_1} - 1.$$

Із останнього співвідношення випливає, що

$$E_1(s) = -\frac{k_s (C_0 s + C_1)}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + (a_2 + k_s C_0)s + k_s C_1}. \quad (4.22)$$

Після введення таких позначень: $\mu_0 = a_0$; $\mu_1 = a_1$; $\mu_2 = a_2$; $b_1 = -k_s C_0$; $b_2 = -k_s C_1$; $\pi_0 = a_0$; $\pi_1 = a_1$; $\pi_2 = a_2 + k_s C_0$; $\pi_3 = k_s C_1$, формули (4.20) і (4.21) набудуть такого вигляду:

$$E(s) = \frac{\mu_0 s^2 + \mu_1 s + \mu_2}{\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3}, \quad (4.23)$$

$$E_1(s) = \frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3}, \quad (4.24)$$

де $b_0 = 0$.

Аналіз формул (4.23) і (4.24) показує, що порядки поліномів чисельників і знаменників відрізняються на одиницю. Тому для обчислень J_0 і J_1 можна скористатись готовими формулами [58]. Отже,

$$J_0 = \frac{\mu_0^2 \pi_2 \pi_3 + (\mu_1^2 - 2\mu_0 \mu_2) \pi_0 \pi_3 + \mu_2^2 \pi_0 \pi_1}{2\pi_0 \pi_3 (\pi_1 \pi_2 - \pi_0 \pi_3)}, \quad (4.25)$$

$$J_1 = \frac{b_0^2 \pi_1 \pi_3 + (b_1^2 - 2b_0 b_2) \pi_0 \pi_3 + b_2^2 \pi_0 \pi_1}{2\pi_0 \pi_3 (\pi_1 \pi_2 - \pi_0 \pi_3)}.$$

Оскільки $b_0 = 0$, то

$$J_1 = \frac{b_1^2 \pi_3 + b_2^2 \pi_1}{2\pi_3 (\pi_1 \pi_2 - \pi_0 \pi_3)}. \quad (4.26)$$

Якщо врахувати (4.25) і (4.26), то формула (4.20) буде такою:

$$J = \frac{1}{J_D} \left(\frac{1}{\pi_0} J_{N,1} + \tau^2 J_{N,2} \right), \quad (4.27)$$

де $J_{N,1} = \mu_0^2 \pi_2 \pi_3 + (\mu_1^2 - 2\mu_0 \mu_2) \pi_0 \pi_3 + \mu_2^2 \pi_0 \pi_1$;

$J_{N,2} = b_1^2 \pi_3 + b_2^2 \pi_1$;

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

Комп'ютерні експерименти показали, що функція (4.27) у загальному випадку є багатоекстремальною і результат її мінімізації, за умови, що $C_0 > 0$ і $C_1 > 0$, залежить від початкових умов.

Тому для розв'язування задачі (4.17) застосуємо такий підхід: параметри налаштування ПІ-регулятора $C_0 > 0$ і $C_1 > 0$ виберемо за методом розміщення полюсів замкненої системи (рис. 4.3) на комплексній площині [59], що дасть змогу виразити значення C_0 і C_1 у функції певних значень, які характеризують розміщення полюсів на комплексній площині; потім будемо мінімізувати критерій (4.26) за деякими параметрами полюсів.

Отже, знайдемо передавальну функцію замкненої системи. У відповідності з рис.4.3 маємо

$$W_{y\theta_{ir}}(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)}. \quad (4.28)$$

Оскільки передавальна функція $W(s)$ задана виразом (4.19), то

$$W_{y\theta_{ir}}(s) = \frac{k_s(C_0s + C_1)}{a_0s^3 + a_1s^2 + (a_2 + k_sC_0)s + k_sC_1}. \quad (4.29)$$

Допускаємо, що корені характеристичного рівняння

$$a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3 = 0 \quad (4.30)$$

є такими: $s_1 = -\alpha + j\beta$, $s_2 = -\alpha - j\beta$, де $\alpha > 0$, $\beta > 0$. Такі співвідношення між величинами α , β гарантують стійкість замкненої системи, яка зображена на рис. 4.3.

Задаємось ступенем затуханням перехідного процесу: $\mu = \frac{\beta}{\alpha}$. Тоді

$$s_1 = -\alpha(1 - j\mu) \text{ і } s_2 = -\alpha(1 + j\mu).$$

Використавши теорему Вієта, знаходимо залежності між величинами α і μ та параметрами характеристичного рівняння (4.30). Отже,

$$s_1 + s_2 + s_3 = -\frac{\pi_1}{\pi_0}, \quad (4.31)$$

$$s_1s_2 + s_1s_3 + s_2s_3 = \frac{\pi_2}{\pi_0}. \quad (4.32)$$

$$s_1s_2s_3 = -\frac{\pi_3}{\pi_0}. \quad (4.33)$$

Із (4.31) визначимо $s_3 = -\frac{\pi_1}{\pi_0} - (s_1 + s_2)$. Якщо тепер врахувати значення s_1

і s_2 , то будемо мати: $s_3 = -\frac{\pi_1}{\pi_0} + 2\alpha$.

Далі, значення s_1 , s_2 і s_3 підставимо в рівняння (4.32) і (4.33). У результаті отримаємо такі співвідношення:

$$\alpha^2 r + 2\alpha \left(\frac{a_1}{a_0} - 2\alpha \right) = \frac{a_2 + k_s C_0}{\pi_0},$$

$$\alpha^2 r \left(\frac{a_1}{a_0} - 2\alpha \right) = \frac{\pi_3}{\pi_0},$$

де $r = \mu^2 + 1$

Прийнявши до уваги значення π_2 і π_3 , маємо таку систему рівнянь:

$$\alpha^2 r + 2\alpha \left(\frac{a_1}{a_0} - 2\alpha \right) = \frac{a_2 + k_s C_0}{\pi_0},$$

$$\alpha^2 r \left(\frac{a_1}{a_0} - 2\alpha \right) = \frac{k_s C_1}{\pi_0},$$

із якої знаходимо

$$C_0 = \frac{1}{k_s} \left(\pi_0 \alpha^2 r + 2\alpha (a_1 - 2\pi_0 \alpha) - a_2 \right), \quad (4.34)$$

$$C_1 = \frac{1}{k_s} \alpha^2 r (a_1 - 2\pi_0 \alpha). \quad (4.35)$$

Якщо тепер значення C_0 і C_1 , які є функціями α , підставити в узагальнений квадратичний критерій (4.27), то отримаємо функціональну залежність $J(\alpha)$. Оскільки наша мета – мінімізувати критерій (4.27), то задача обчислення значень параметрів ПІ-регулятора зводиться до одновимірної оптимізації на інтервалі $[\alpha^{(1)}; \alpha^{(2)}]$.

Інтервал локального мінімуму виберемо із умови одночасного виконання нерівностей:

$$C_0 > 0, C_1 > 0 \text{ і } 0 < \alpha < \frac{a_1}{2a_0}. \quad (4.36)$$

Для побудови залежності $J(\alpha)$, був вибраний інтервал зміни α у відповідності з умовами (4.36), тобто: $\alpha^{(0)} = 10^{-3}$, $\alpha^{(f)} = 0,3$. Графік залежності

$J(\alpha)$ зображений на рис. 4.4, із якого видно, що функція $J(\alpha)$ має яскраво виражений мінімум.

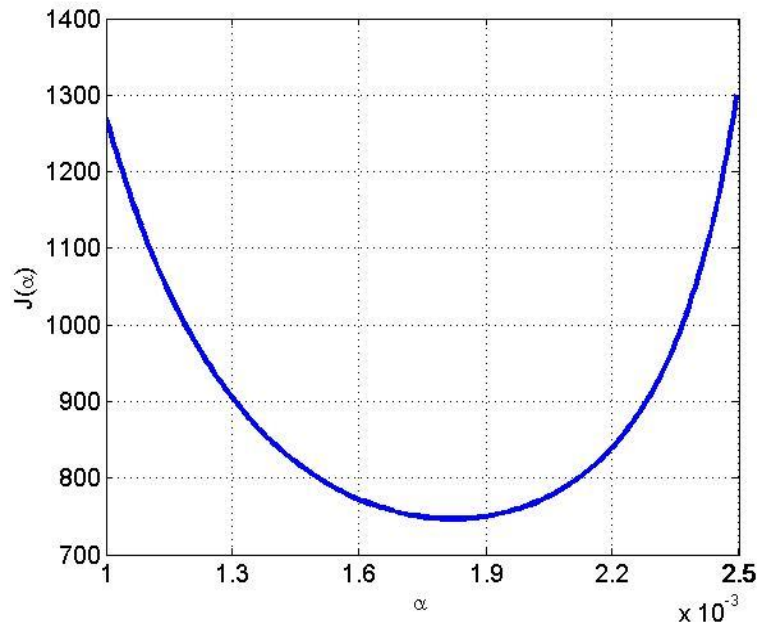


Рисунок 4.4 - Графік залежності $J(\alpha)$

Мінімізацію функції $J(\alpha)$ за умови, що $\alpha \in [\alpha^{(1)}; \alpha^{(2)}]$, виконана в середовищі MatLab за допомогою вбудованої файл-функції fminbnd. Були вибрані такі значення $\alpha^{(1)} = 1,6 \cdot 10^{-3}$, $\alpha^{(2)} = 2,0 \cdot 10^{-3}$ і $\mu = 0,2$. Результатом мінімізації є таке значення: $\alpha^* = 1,8224 \cdot 10^{-3}$.

Після підстановки значення α^* у формули (4.34) і (4.35), отримали: $C_0 = 4,9749 \cdot 10^3$, $C_1 = 10,873$.

Із графіка перехідного процесу системи автоматичного керування (рис. 4.3), який зображений на рис. 4.5, визначені параметри якості процесу керування:

- перерегулювання $\sigma = 0\%$;
- час регулювання $t_c = 4200$ с.

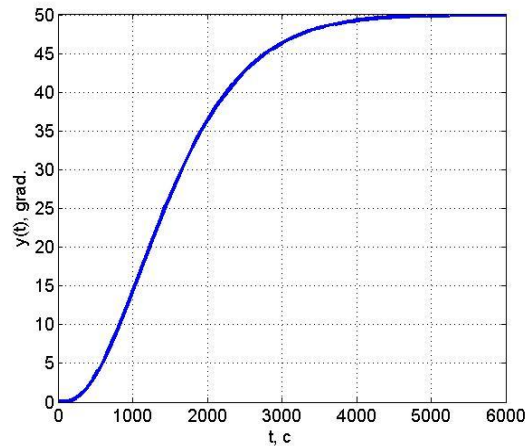


Рисунок 4.5 - Графік перехідного процесу одноконтурної автоматичної системи керування

На рис. 4.6 зображений графік одноконтурної системи автоматичного керування (рис. 4.3), який отриманий як результат розв'язання такої задачі мінімізації (додаток 3) :

$$\min_{C_0 > 0, C_1 > 0} : J(C_0, C_1). \quad (4.37)$$

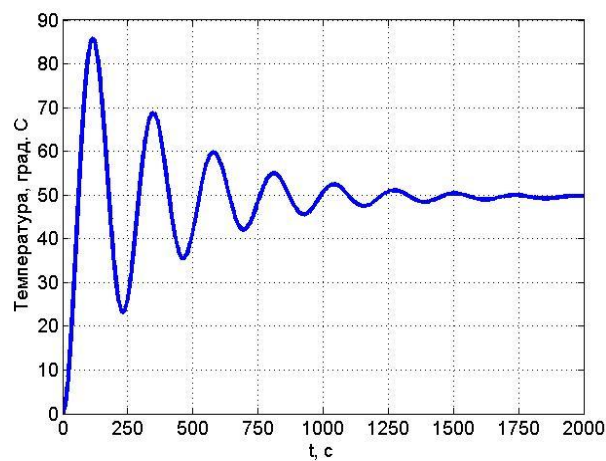


Рисунок 4.6 - Графік перехідного процесу автоматичної системи керування як результат розв'язування задачі (4.37)

Зауважимо, що у стандартній постановці обмеження на ресурси оптимізації мають такий вигляд: $g_i(\bar{x}) \geq 0$, де $\bar{x}$ - вектор-змінна. Обмеження в задачі (4.37) є строго додатними. Це означає, що процес пошуку оптимальних

значень C_0 і C_1 повинен здійснюватися на множині, яка утворена нерівностями $C_0 > 0$ і $C_1 > 0$.

Тому для розв'язання задачі оптимізації (4.27) був вибраний метод внутрішньої точки (метод штрафів) [60], у відповідності з яким задача (4.37) на умовний мінімум зводиться до задачі безумовної мінімізації, тобто

$$L(C_0, C_1, r) = J(C_0, C_1) - r(\log C_0 + \log C_1), \quad (4.38)$$

де $J(C_0, C_1)$ - узагальнений квадратичний критерій, що обчислюється за формулою (4.27).

Наявність параметру r в задачі (4.38) зумовлює ітераційний процес пошуку оптимальних значень параметрів налаштування C_0 і C_1 ПІ-регулятора. Початкове значення r було вибрано рівнем одиниці. Потім розв'язок задачі (4.38) шукали, зменшуючи значення r на 0,01. Кінцеве значення r було таким: $r = 0,001$.

У результаті розв'язання задачі (4.38) у середовищі MatLab отримали:

ПАРАМЕТРИ НАЛАШТУВАННЯ ПІ-РЕГУЛЯТОРА

$C_0 = 1.2733e+06$

$C_1 = 1.7248e+01$

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ

Перерегулювання

$\sigma = 72.3626\%$

Час регулювання

$t_c = 1056.6000$ с

Порівнюючи показники процесу керування, які отримані при обчисленні параметрів налаштування C_0 і C_1 ПІ-регулятора двома методами, можна зробити висновок, що реалізація методу штрафних функцій призвела до недопустимого великого перерегулювання.

Метод обчислення параметрів налаштування C_0 і C_1 ПІ-регулятора методом розміщення полюсів на комплексній площині дозволив значно зменшити величину перерегулювання з 72,4 % до 0 %. При цьому збільшився час регулювання у порівнянні з методом внутрішньої точки. Не дивлячись на

таке збільшення перерегулювання, перевагу слід віддати комбінованому методу визначення параметрів налаштування ПІ-регулятора, який забезпечує значно менше перерегулювання.

Аналіз отриманих результатів показує, що одноконтурна система не забезпечує належну якість процесу керування. Час регулювання становить 4200 с., що не задовольняє вимогам до швидкодії системи.

Тому є потреба у нових структурно-параметричних рішеннях для покращення якості процесу керування шляховим нагрівачем.

4.3 Каскадно-зв'язана система автоматичного керування нагрівачем непрямої дії

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. 2.3). 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 [43]. 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. 4.2а і 3.7 зображені редуковані 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 (4.15), а канал $u - \theta_{dg}$ характеризується передавальною функцією

$$W_{23}^r(s) = \frac{k_r}{a_0^{(r)}s + a_1^{(r)}}.$$

Аналіз перехідних характеристик (рис. 4.2а і 3.4) 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. 4.7).

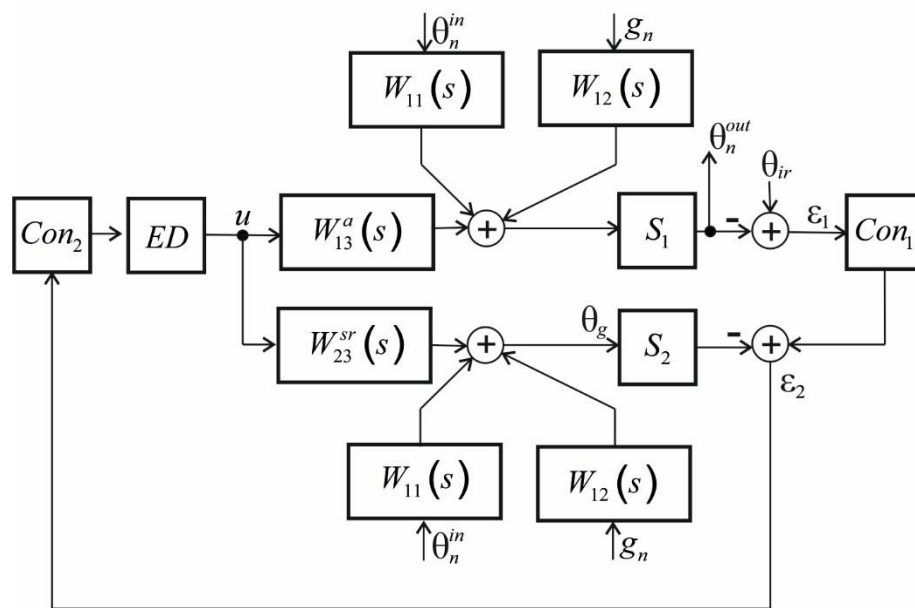


Рисунок 4.7 - Каскадно-зв'язана система автоматичного керування процесом нагрівання нафти

Каскадно-зв'язана система, яка зображена на рис. 4.7, 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. 4.7) 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.

Передавальну функцію датчика температури в [61] рекомендовано вибрати у вигляді аперіодичної ланки другого порядку з такими параметрами: $T_1 = 30\text{ с}$ і $T_2 = 5\text{ с}$. Вибір датчика S_2 з такими динамічними властивостями збільшує порядок передавальної функції системи керування на одиницю, що привносить додаткові труднощі в обчисленні узагальненого квадратичного критерію. Тому передавальну функцію датчика S_2 з використанням методу площ апроксимовано аперіодичною ланкою першого порядку. Результат такої апроксимації відтворює рис. 4.8. У результаті апроксимації отримали $T_{sr} = 33.8\text{ с}$.

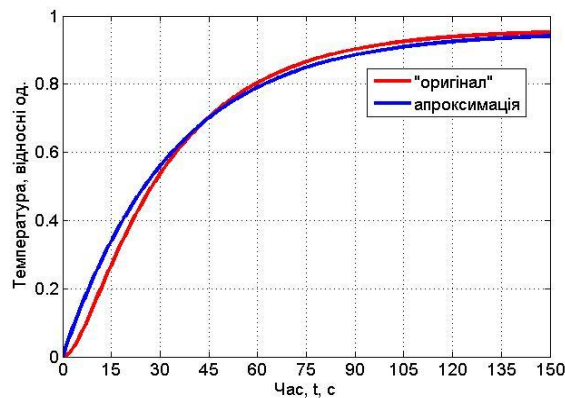


Рисунок 4.8 - Результат апроксимації динаміки датчика S_2 аперіодичною ланкою першого порядку

Канал «керуюча дія U – температура димових газів T_{dg} » має значну меншу інерційність, ніж термопара. Тому допускаємо, що канал $U - T_{dg}$ є без інерційним і його передавальна функція є такою:

$$W_{23}^r(s) = k_r.$$

Отже,

$$W_{23}^{sr}(s) = W_{23}^r(s) W_{sr}(s).$$

З врахування зробленого допущення щодо динамічних властивостей каналу $U - T_n^{out}$, будемо мати

$$W_{23}^{sr}(s) = \frac{k_{sa}}{T_{sr}s + 1}, \quad (4.39)$$

де $k_s = k_r k_{sr}$.

На рис. 4.9 зображені графіки перехідних процесів, побудовані за передавальною функцією (4.39) та за передавальною функцією

$$W_{23}^{sr}(s) = \frac{k_{sa}}{(\alpha_0 s + \alpha_1)(T_{sr}s + 1)}.$$

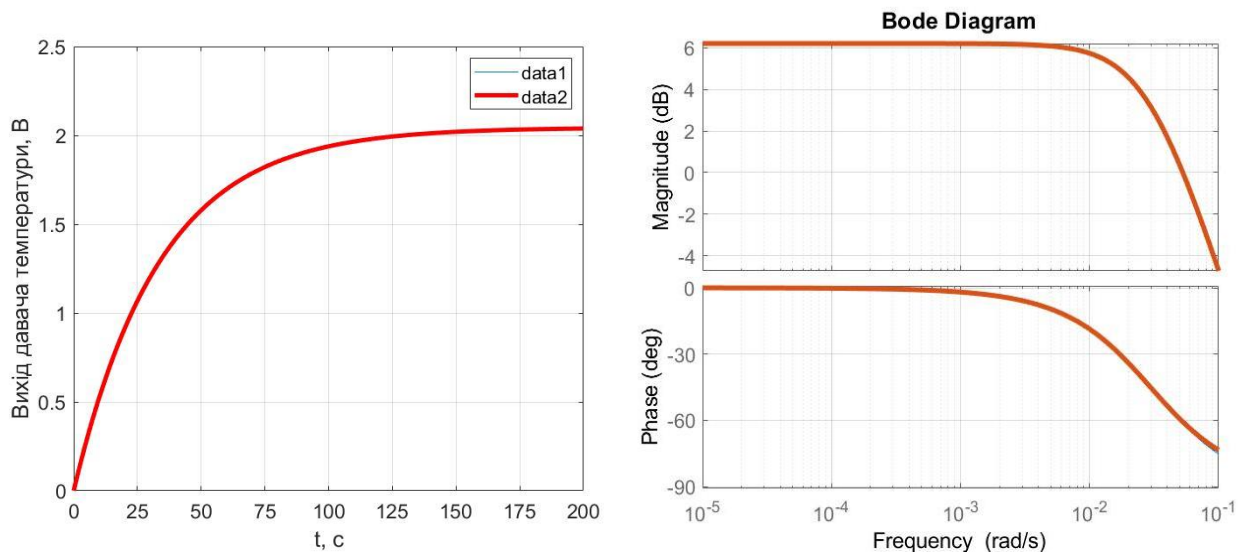


Рисунок 4.9 - Перехідні та ЛЧХ характеристики з врахуванням інерційності каналу $U - T_n^{out}$ та, побудованої за передавальною функцією (4.39).

Вводимо такі позначення: $\alpha_0 = T_{sr}$, $\alpha_1 = 1$. Тоді

$$W_{23}^{sr}(s) = \frac{k_{sa}}{\alpha_0 s + \alpha_1}. \quad (4.40)$$

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

$$W_{ED}(s) = k_{ED}. \quad (4.41)$$

Допускаємо, що в основний контур керування включений ПІ-регулятор з передавальною функцією

$$W_{cn,1}(s) = \frac{C_0^{(1)}s + C_1^{(1)}}{s}, \quad (4.42)$$

а в допоміжний контур вміщує П-регулятор з такою передавальною функцією:

$$W_{cn,2}(s) = C_0^{(2)}. \quad (4.43).$$

У формулах (4.42) і (4.43) $C_0^{(1)}$, $C_1^{(1)}$ і $C_0^{(2)}$ - параметри налаштування Con_1 і Con_2 регуляторів.

Вибір пропорційного регулятора дасть змогу по-перше, зменшити порядок передавальних функцій системи керування, а по-друге, наявність в основному контурі керування ПІ-регулятора надає системі керування астатизму першого порядку.

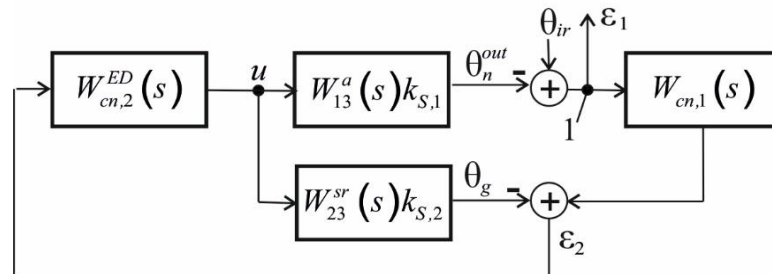
Поставимо таку задачу: знайти такі параметри налаштування $C_0^{(1)}$, $C_1^{(1)}$, $C_0^{(2)}$ і $C_1^{(2)}$ регуляторів Con_1 і Con_2 (рис. 4.7), щоб узагальнений квадратичний критерій (4.27), набув би мінімального значення.

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. 4.10, у якій вихідною величиною є похибка неузгодженості ε_1 , а вхідною – завдання θ_{ir} основному регулятору Con_1 .

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

$$W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s) = \frac{1 + W_{cn,2}^{ED}(s)W_{23}^{sr}(s)}{1 + W_{cn,2}^{ED}(s)(W_{23}^{sr}(s) + k_{s,1}W_{13}^a(s)W_{cn,1}(s))}, \quad (4.44)$$

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



**Рисунок 4.10 - Структурна схема системи керування за каналом
«завдання регулятора-величина неузгодженості»**

Після врахування значень передавальних функцій, які визначені формулами (4.15), (4.39), (4.40) і (4.41), отримали передавальну функцію величини неузгодженості ε_1 відносно завдання регулятора θ_{ir} (рис. 4.10) у такому вигляді:

$$W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s) = \frac{s(\beta_0 s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3)}{\pi_0 s^4 + \pi_1 s^3 + \pi_2 s^2 + \pi_3 s + \pi_4}, \quad (4.45)$$

де $\pi_0 = a_0 \alpha_0$;

$$\pi_1 = a_0(\alpha_1 + k_r^{ED} C_0^{(2)}) + a_1 \alpha_0;$$

$$\pi_2 = a_1 \alpha_1 + \alpha_0(a_2 + k_s C_0^{(2)} C_0^{(1)}) + a_1 k_r^{ED} C_0^{(2)};$$

$$\pi_3 = a_2 \alpha_1 + C_0^{(2)}(a_2 k_r^{ED} + \alpha_1 k_s C_0^{(1)} + \alpha_0 k_s C_1^{(1)});$$

$$\pi_4 = k_s \alpha_1 C_0^{(2)} C_1^{(1)};$$

$$\beta_0 = a_0 \alpha_0; \quad \beta_1 = a_1 \alpha_0 + a_0(\alpha_1 + k_r^{ED} C_0^{(2)}); \quad \beta_2 = a_2 \alpha_0 + a_1(\alpha_1 + k_r^{ED} C_0^{(2)}).$$

Знайдемо статичну похибку керування відносно завдання регулятора

Con_1

$$\varepsilon_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon_1(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s E_1(s),$$

де $E_1(s)$ -зображення за Лапласом похибки керування $\varepsilon_1(t)$ при стрибкоподібній входній дії $\theta_{ir}(t)=1(t)$.

Враховуючи, зображення за Лапласом одиничної функції, будемо мати $\varepsilon_\infty = \lim_{s \rightarrow 0} W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s)$. Якщо прийняти до уваги значення $W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s)$, яке задано формулою (4.44), то $\varepsilon_\infty = 0$, тобто система з ПІ- та з ПІ-регуляторами, які включені відповідно в основний і допоміжний контури керування (рис. 4.10), у статичному режимі забезпечує нульову похибку керування.

Для обчислення узагальненого квадратичного критерію (4.27) знайдемо зображення за Лапласом вихідної величини $\varepsilon_1(t)$ за умови, що на вході діє одиничне стрибкоподібне збурення.

Оскільки

$$E_1(s) = W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s)\theta_{ir}(s),$$

то при одиничному стрибкоподібному збуренні $\theta_{ir}(s) = \frac{1}{s}$ будемо мати

$$E_1(s) = \frac{W_{\varepsilon\theta_{ir}}(s)}{s}.$$

Врахування формули (4.45) дало такий результат:

$$E_1(s) = \frac{\mu_0 s^3 + \mu_1 s^2 + \mu_2 s + \mu_3}{\pi_0 s^4 + \pi_1 s^3 + \pi_2 s^2 + \pi_3 s + \pi_4}, \quad (4.46)$$

Для визначення складової $J_{N,2}$ із формули (4.48) необхідно обчислити зображення за Лапласом похідної від величини неузгодженості, тобто

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

За теоремою про кінцеве значення оригіналу за його зображенням знаходимо

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

Оскільки $E_1(s)$ задано формулою (4.45), то

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

Так як $\mu_0 = \pi_0 = \alpha_0 \alpha_0$, то $\varepsilon_1(0) = 1$.

З врахуванням знайденого значення $\varepsilon_1(0)$ та формули (4.46), маємо:

$$E_1(s) = \frac{\mu_0 s^3 + \mu_1 s^2 + \mu_2 s + \mu_3}{\pi_0 s^4 + \pi_1 s^3 + \pi_2 s^2 + \pi_3 s + \pi_4}, \quad (4.47)$$

де $\mu_0 = \beta_1 - \pi_1$; $\mu_1 = \beta_2 - \pi_2$; $\mu_2 = \beta_3 - \pi_3$; $\mu_3 = -\pi_4$.

Аналізуючи формули (4.46) і (4.47), бачимо, що різниці поліномів чисельника і знаменника як в (4.46), так і в (4.47) дорівнюють одиниці; крім того вирази (4.46) і (4.47) мають тотожні знаменники. Тому узагальнений квадратичний критерій обчислимо за формулою (4.27)

Для обчислень J_D , $J_{N,1}$ і $J_{N,2}$ скористаємося формулами, які наведені в [62]. Для $n=4$ знаходимо:

$$\begin{aligned} J_{N,1} &= \beta_0^2 (\pi_2 \pi_3 \pi_4 - \pi_1 \pi_4^2) + (\beta_1^2 - 2\beta_0 \beta_2) \pi_0 \pi_3 \pi_4 + (\beta_2^2 - 2\beta_1 \beta_3) \pi_0 \pi_1 \pi_4 + \beta_3^2 (\pi_0 \pi_1 \pi_2 - \pi_0^2 \pi_3); \\ J_{N,2} &= \mu_0^2 (\pi_2 \pi_3 \pi_4 - \pi_1 \pi_4^2) + (\mu_1^2 - 2\mu_0 \mu_2) \pi_0 \pi_3 \pi_4 + (\mu_2^2 - 2\mu_1 \mu_3) \pi_0 \pi_1 \pi_4 + \mu_3^2 (\pi_0 \pi_1 \pi_2 - \pi_0^2 \pi_3); \\ J_D &= 2\pi_0 \pi_4 (\pi_1 \pi_2 \pi_3 - \pi_1^2 \pi_4 - \pi_0 \pi_3^2). \end{aligned}$$

Параметри налаштування ПІ- і П-регуляторів визначимо за узагальненим методом [63].

Відмітимо, що характеристичне рівняння системи є таким:

$$\pi_0 s^4 + \pi_1 s^3 + \pi_2 s^2 + \pi_3 s + \pi_4 = 0. \quad (4.48)$$

Оскільки характеристичне рівняння системи має четвертий порядок, то згідно теореми Вієта між коефіцієнтами характеристичного рівняння і його коренями існують такі співвідношення:

$$s_1 + s_2 + s_3 + s_4 = -\frac{\pi_1}{\pi_0}; \quad (4.49)$$

$$s_1 s_2 + s_1 s_3 + s_1 s_4 + s_2 s_3 + s_2 s_4 + s_3 s_4 = \frac{\pi_2}{\pi_0}; \quad (4.50)$$

$$s_1 s_2 s_3 + s_1 s_2 s_4 + s_1 s_3 s_4 + s_2 s_3 s_4 = -\frac{\pi_3}{\pi_0}; \quad (4.51)$$

$$s_1 s_2 s_3 s_4 = \frac{\pi_4}{\pi_0}; \quad (4.52)$$

Корені s_i , $i = \overline{1, 4}$ виберемо так, щоб система автоматичного керування нагрівником була стійкою

Нехай $s_1 = -\alpha + j\beta$; $s_2 = -\alpha - j\beta$; $s_3 = -k_1\alpha$.

Із рівняння (4.49) знаходимо

$$s_4 = -\frac{\pi_1}{\pi_0} - (s_1 + s_2 + s_3).$$

Оскільки значення коренів s_1 , s_2 і s_3 відомі, то

$$s_4 = k_q\alpha - \frac{\pi_1}{\pi_0},$$

де $k_q = k_1 + 2$.

Система автоматичного керування нагрівачем буде стійкою якщо корені характеристичного рівняння (4.48) будуть лівими [64]. Це означає, що повинні виконуватись такі умови:

$$\alpha > 0, \beta > 0, k_1 > 0 \text{ і } k_q\alpha - \frac{\pi_1}{\pi_0} < 0.$$

Задаємось ступенем затуханням перехідного процесу: $\mu = \frac{\beta}{\alpha}$. Тоді

$$s_1 = -\alpha(1 - j\mu) \text{ і } s_2 = -\alpha(1 + j\mu).$$

Рівняння (4.50), (4.51) запишемо у такому вигляді:

$$s_1 s_2 + (s_3 + s_4)(s_1 + s_2) + s_3 s_4 = \frac{\pi_2}{\pi_0}; \quad (4.53)$$

$$s_1 s_2 (s_3 + s_4) + (s_1 + s_2) s_3 s_4 = -\frac{\pi_3}{\pi_0}. \quad (4.54)$$

Значення коренів s_i , $i = \overline{1, 4}$ характеристичного рівняння (4.48) підставили в (4.52) і (4.53). У результаті отримали

$$\pi_0(r - k_q k_1 - 4)\alpha^2 = \pi_2 - k_q\alpha\pi_1, \quad (4.55)$$

$$2\pi_0\alpha^3(r+k_1k_q)=(r+2k_1)\alpha^2\pi_1-\pi_3, \quad (4.56)$$

де $r=1+\mu^2$.

Якщо врахувати значення π_1 і π_3 , то приходимо до такої системи алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} k_s\alpha_0C_0+(a_1-a_0k_q\alpha)k_r^{ED}C_0^{(2)}= \\ =\pi_0(r-k_qk_1-4)\alpha^2+k_q(a_0\alpha_1+a_1\alpha_0)\alpha-a_1\alpha_1-a_2\alpha_0, \end{aligned} \quad (4.57)$$

$$2\pi_0\alpha^3(r+k_1k_q)=(r+2k_1)\alpha^2\pi_1-a_2\alpha_1-a_2k_r^{ED}C_0^{(2)}-\alpha_1k_sC_0^{(2)}C_0^{(1)}-\alpha_0k_sC_0^{(2)}C_1^{(1)}. \quad (4.58)$$

Рівняння (4.58) є нелінійним відносно параметрів $C_0^{(1)}$, $C_0^{(2)}$ і $C_1^{(1)}$ налаштування ПІ- і ПІД-регуляторів. Зробимо таку заміну: $C_0=C_0^{(2)}C_0^{(1)}$, із (4.52) знаходимо

$$r\alpha^2k_1\alpha\left(\frac{\pi_1}{\pi_0}-k_q\alpha\right)=\frac{\pi_4}{\pi_0}.$$

Врахування значення π_4 дає змогу із останнього рівняння визначити

$$C_0^{(2)}C_1^{(1)}=\frac{\pi_0rk_1\alpha^3}{k_s\alpha_1}\left(\frac{\pi_1}{\pi_0}-k_q\alpha\right). \quad (4.59)$$

Якщо добуток $C_0^{(2)}C_1^{(1)}$, який визначений (4.59), підставити в рівняння (4.58) і врахувати значення π_1 , то отримаємо

$$\begin{aligned} -\alpha_1k_sC_0+\left(a_0\alpha^2\left((r+2k_1)-\frac{\alpha_0}{\alpha_1}rk_1\alpha\right)-a_2\right)k_r^{ED}C_0^{(2)}=-\frac{\alpha_0}{\alpha_1}\pi_0rk_1k_q\alpha^4+ \\ +2\pi_0(r+k_1k_q)\alpha^3-\left((r+2k_1)-\frac{\alpha_0}{\alpha_1}rk_1\alpha\right)(a_0\alpha_1+a_1\alpha_0)\alpha^2+a_2\alpha_1. \end{aligned} \quad (4.60)$$

Таким чином, шляхом зроблених заміни перейшли від нелінійного рівняння (4.58) до лінійного алгебраїчного рівняння (4.60).

Систему рівнянь (4.58) і (4.60) запишемо у матрично-векторній формі

$$A\bar{C}=\bar{q}, \quad (4.61)$$

$$\text{де } A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \bar{C}=\begin{bmatrix} C_0 \\ C_0^{(2)} \end{bmatrix}, \bar{q}=\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}.$$

Із рівнянь (4.58) і (4.60) витікають такі значення елементів матриць, що входять у формулу (4.61).

$$\begin{aligned} a_{11} &= k_s \alpha_0, \quad a_{12} = (a_1 - a_0 k_q \alpha) k_r^{ED}, \\ a_{21} &= -\alpha_1 k_s, \quad a_{22} = \left(a_0 \alpha^2 \left((r + 2k_1) - \frac{\alpha_0}{\alpha_1} r k_1 \alpha \right) - a_2 \right) k_r^{ED}; \\ q_1 &= \pi_0 (r - k_q k_1 - 4) \alpha^2 + k_q (a_0 \alpha_1 + a_1 \alpha_0) \alpha - a_1 \alpha_1 - a_2 \alpha_0, \\ q_2 &= -\frac{\alpha_0}{\alpha_1} \pi_0 r k_1 k_q \alpha^4 + 2\pi_0 (r + k_1 k_q) \alpha^3 - \left((r + 2k_1) - \frac{\alpha_0}{\alpha_1} r k_1 \alpha \right) (a_0 \alpha_1 + a_1 \alpha_0) \alpha^2 + a_2 \alpha_1. \end{aligned}$$

Із матрично-векторного рівняння (4.61) знайшли величини $C_0^{(1)}$ і $C_0^{(2)}$ як розв'язок лінійних алгебраїчних рівнянь (4.58) і (4.60), тобто

$$\bar{C} = A^{-1} \bar{q}. \quad (4.62)$$

Оскільки $C_0^{(2)}$ відоме, то за відомими значеннями π_0 і π_1 із (4.59) знаходимо

$$C_1^{(1)} = \frac{\pi_0 r k_1 \alpha^3}{k_s \alpha_1 C_0^{(2)}} \left(\frac{\pi_1}{\pi_0} - k_q \alpha \right). \quad (4.63)$$

Враховуючи те, що $C_0 = C_0^{(2)} C_0^{(1)}$, обчислимо

$$\frac{C_0}{C_0^{(2)}} = C_0^{(1)}. \quad (4.64)$$

Таким чином, розв'язавши систему рівнянь (4.58) і (4.60), за формулами (4.62) і (4.63) можна обчислити параметри $C_0^{(1)}$, $C_0^{(2)}$ і $C_1^{(1)}$ налаштування ПІ- і ПІ-регуляторів.

Після підстановки значень $C_0^{(1)}$, $C_0^{(2)}$ і $C_1^{(1)}$, які визначені формулами (4.63) і (4.64), у формулу (4.27) (з врахуванням значень $J_{N,1}$, $J_{N,2}$ і J_D) узагальнений квадратичний критерій (4.27) буде функцією двох величин α і μ .

Від ступеня затухання перехідного процесу μ залежить величина перерегулювання σ [64], вибираючи значення μ , можна добитись бажаного значення величини σ . Отже, при вибраному значенню μ узагальнений квадратичний критерій (4.27) буде функцією однієї змінної α .

За допомогою програмного забезпечення (додаток Ж), розробленого в середовищі MatLab, побудований графік залежності $J(\alpha)$.

Інтервал для величини α вирали таким, щоб виконувалась умови: $C_0^{(1)} > 0$, $C_0^{(2)} > 0$, $C_1^{(1)} > 0$ і $k_q \alpha - \frac{\pi_1}{\pi_0} < 0$, які впливають із вимог до стійкості системи.

Були вибрані такі значення величин: $\mu = 0,2$; $k_1 = 1,2$ s $\tau = 20$.

Графік залежності $J(\alpha)$ зображений на рис. 4.11, із якого видно, що мінімум функції $J(\alpha)$ досягається на нижній межі інтервалу $\alpha \in [\alpha_{min}; \alpha_{max}]$.

За допомогою вбудованої функції fminbnd, знайдено значення $\alpha^* = 1,0082$.

Підставивши α^* в формулу (4.61), знайшли значення C_0 і $C_0^{(2)}$. За відомими значеннями C_0 і $C_0^{(2)}$ та за формулами (4.63) і (4.64) були обчислені інші параметри налаштування ПІ/П-регуляторів $C_0^{(1)}$ і $C_1^{(1)}$.

У результатами обчислень (додаток К) отримали такі значення параметрів налаштування ПІ/П регуляторів:

ПАРАМЕТРИ НАЛАШТУВАННЯ ПІ/П-РЕГУЛЯТОРІВ

C01=1.0194e+03

C11=5.6359e+02

C02=3.2534e+05

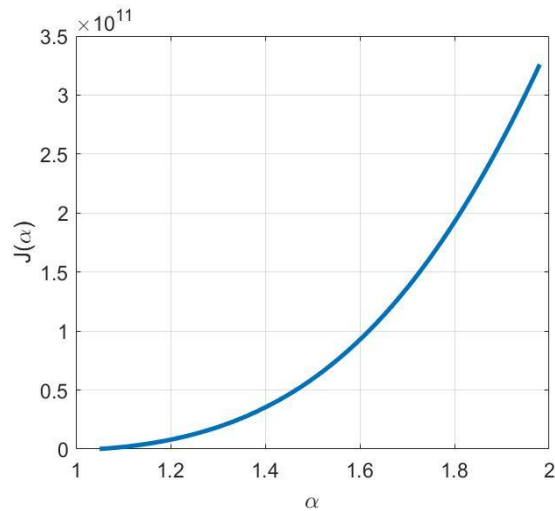


Рисунок 4.11 - Графічна залежність узагальненого квадратичного критерію від α .

Для оцінки якості процесу керування необхідно визначити передавальну функцію за каналом «завдання регулятора 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. 4.12).

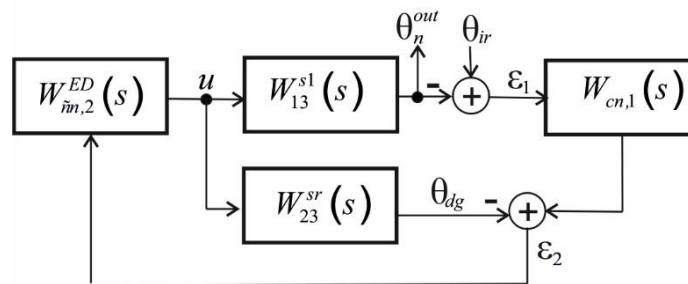


Рисунок 4.12 - Структурна схема системи по каналу $\theta_{ir} - \theta_n^{out}$

Після перенесення вузла «завдання» (рис. 4.12) через передавальну функцію $W_{cn,1}(s)$ за ходом сигналу отримаємо структуру, яка зображена на рис. 4.13.

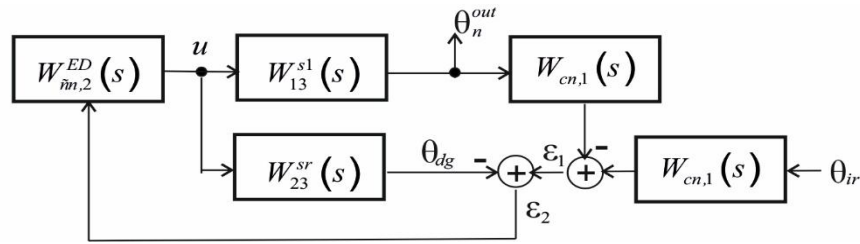


Рисунок 4.13 - Структурна схема системи після перетворення

На основі структурної схеми, зображеної на рис. 4.13, отримана передавальна функція касадно-зв'язаної системи по каналу $\theta_{ir} - \theta_n^{out}$ у такому вигляді:

$$W_{\theta_n^{out} \theta_{ir}}(s) = \frac{W_{cn,1}(s) W_{cn,2}^{ED}(s) W_{13}^{s,1}(s)}{1 + W_{cn,2}^{ED}(s) (W_{23}^{sr}(s) + W_{13}^{s,1}(s) W_{cn,1}(s))}, \quad (4.65)$$

де $W_{13}^{s,1}(s) = W_{13}^a(s) W_{s,1}(s)$.

Після підстановки відповідних передавальних функцій у формулу (4.65), отримали

$$W_{\theta_n^{out} \theta_{ir}}(s) = \frac{k_r^{ED} C_0^{(2)} (b_0 s^2 + b_1 s + b_2)}{\pi_0 s^4 + \pi_1 s^3 + \pi_2 s^2 + \pi_3 s + \pi_4}, \quad (4.66)$$

де $b_0 = \alpha_0 C_0^{(1)}$; $b_1 = \alpha_1 C_0^{(1)} + \alpha_0 C_1^{(1)}$; $b_2 = \alpha_1 C_1^{(1)}$.

За передавальною функцією побудовані (додаток К) перехідні характеристики системи автоматичного керування (рис. 4.14) при оптимальних значеннях $C_0^{(1)}$, $C_0^{(2)}$ і $C_1^{(1)}$,

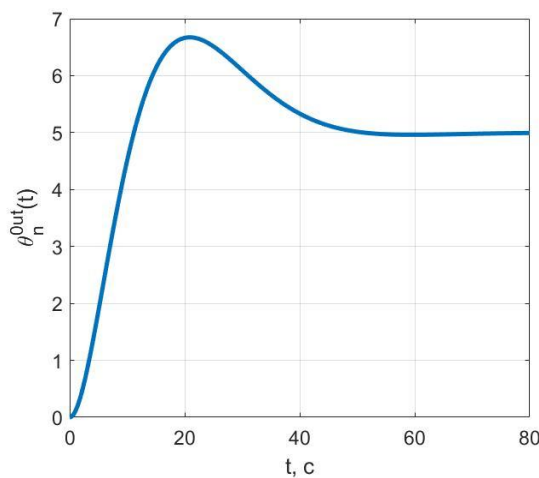


Рисунок 4.14 - Графік перехідного процесу в касадно-зв'язаній системі

Якість процесу керування оцінювалась (додаток К) за двома показниками: перерегулюванням $\sigma\%$ і часом регулювання t_c . Отримали такі значення величин $\sigma\%$ і t_c :

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ

Перерегулювання

$\sigma=33.6572\%$

Час регулювання

$t_c=48.1600$ с

Аналіз отриманих результатів показав, що синтезована каскадно-зв'язана система автоматичного керування процесом нагрівання нафти у нагрівачі з проміжним теплоносієм забезпечила значно менший час регулювання у порівнянні з одноконтурною системою керування. У той же час збільшилася величина перерегулювання, яка склала 33.66%, що може виявитись недопустимим в реальних умовах.

На нашу думку, таке значне перерегулювання зумовлено великою різницею в інерційності між каналів $U - T_n^{out}$ і $U - T_{dg}$.

Пошук методів покращення якості процесу керування об'єктами з високою інерційністю стимулював нові підходи до вирішення поставленої задачі.

4.4. Структурно-параметричний синтез системи автоматичного керування шляховим нагрівником нафти

Структурна схема синтезованої системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти у шляховому нагрівачі [65] зображена на рис. 4.15. Система має у своєму складі два регулятори PI та PD , які описуються такими передавальними функціями:

$$W_{PI}(s) = \frac{C_0^{(1)}s + C_1}{s}, \quad (4.67)$$

$$W_{PD}(s) = C_0^{(2)} + C_2s, \quad (4.68)$$

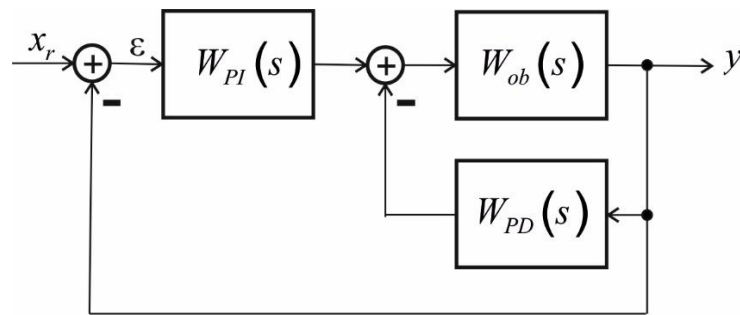


Рисунок 4.15 - Структурна схема автоматичного керування процесом нагрівання нафти

Об'єкт керування з передавальною функцією (4.15) охоплений місцевим від'ємним зворотним зв'язком, у коло якого включений *PD* регулятор (рис. 4.15).

Після структурних перетворень отримали передавальну функцію замкненої системи керування (рис. 4.15)

$$W_{y x_r}(s) = \frac{W_{PI}(s)W_{ob}(s)}{1 + W_{ob}(s)(W_{PD}(s) + W_{PI}(s))}. \quad (4.69)$$

З врахуванням значень передавальних функцій (4.15), (4.40) і (4.41) передавальна функція (4.42) буде такою:

$$W_{y x_r}(s) = \frac{k_s (C_0^{(1)}s + C_1)}{a_0 s^3 + (a_1 + k_s C_2)s^2 + (a_2 + k_s C_0)s + k_s C_1}, \quad (4.70)$$

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 (4.17) набув мінімального значення, тобто

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

Існують таблиці [62], за допомогою яких можна обчислити критерій (4.17), якщо відомі зображення похибки регулювання $\varepsilon(t)$ та її похідної $\dot{\varepsilon}(t)$.

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

$$L[\dot{\varepsilon}(t)] = sE(s) - \varepsilon(0), \quad (4.71)$$

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

Очевидно, що $E(s) = W_{\varepsilon_r}(s)X_r(s)$, де $X_r(s)$ - зображення за Лапласом завдання *PI* регулятору (рис. 4.15).

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

$$E(s) = \frac{1}{s} W_{\varepsilon_r}(s). \quad (4.72)$$

Із рис. 4.15 випливає, що

$$W_{\varepsilon_r}(s) = \frac{1}{1 + W(s)}. \quad (4.73)$$

Передавальна функція $W(s)$ розімкненої системи (рис. 4.15) є такою:

$$W(s) = \frac{W_{PI}(s)W_{ob}(s)}{1 + W_{ob}(s)W_{PD}(s)}, \quad (4.74)$$

З врахуванням (4.49) формула (4.48) набуде такого вигляду:

$$W_{\varepsilon_r}(s) = \frac{1 + W_{ob}(s)W_{PD}(s)}{1 + W_{ob}(s)(W_{PD}(s) + W_{PI}(s))}. \quad (4.75)$$

Якщо вирази (4.15), (4.40) і (4.41) підставити в (4.75), то отримаємо

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

Отриманий результат дає змогу знайти зображення похибки керування за формулою (4.72)

$$E(s) = \frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3}, \quad (4.76)$$

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 $\beta = \frac{C_0^{(1)}}{C_0^{(2)}}$. Оскільки $C_0^{(1)} = \beta C_0^{(2)}$, то із рівняння $C_0 = C_0^{(1)} + C_0^{(2)}$ випливає, що $C_0^{(2)} = \frac{C_0}{(1 + \beta)}$.

Тепер визначимо $E_1(s)$ за формулою (4.71)

$$E_1(s) = \frac{p_0 s^2 + p_1 s + p_2}{\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3}, \quad (4.77)$$

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

Формули (4.51) і (4.52) дають змогу визначити [62] складові у виразі (4.45)

$$J_{N1} = b_0^2 \pi_2 \pi_3 + (b_1^2 - 2b_0 b_2) \pi_0 \pi_3 + b_2^2 \pi_0 \pi_1, \quad (4.78)$$

$$J_{N2} = p_0^2 \pi_2 \pi_3 + (p_1^2 - 2p_0 p_2) \pi_0 \pi_3 + p_2^2 \pi_0 \pi_1, \quad (4.79)$$

$$J_D = 2\pi_0 \pi_3 (\pi_1 \pi_2 - \pi_0 \pi_3). \quad (4.80)$$

Поставлену задачу будемо вирішувати в два етапи [62]. На першому етапі визначимо параметри налаштування PI та PD регуляторів, використавши метод s -площини [59]. Для цього запишемо систему рівнянь, яка витікає із теореми Вієта

$$\begin{aligned} s_1 + s_2 + s_3 &= -\frac{\pi_1}{\pi_0}, \\ s_1 s_2 + s_1 s_3 + s_2 s_3 &= \frac{\pi_2}{\pi_0}, \\ s_1 s_2 s_3 &= -\frac{\pi_3}{\pi_0}. \end{aligned} \quad (4.81)$$

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. 4.15) 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 (4.81) отримали

$$k_s C_2 = \pi_0 (2 + k_1) \alpha - a_1,$$

$$k_s C_0 = \pi_0 (r + 2k_1) \alpha^2 - a_2,$$

$$k_s C_1 = \pi_0 r k_1 \alpha^3$$

із якої визначили

$$C_0 = \frac{1}{k_s} (\pi_0 (r + 2k_1) \alpha^2 - a_2), \quad (4.82)$$

$$C_1 = \frac{k_1}{k_s} \pi_0 r \alpha^3, \quad (4.83)$$

$$C_2 = \frac{1}{k_s} (\pi_0 (2 + k_1) \alpha - a_1), \quad (4.84)$$

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 (4.78) – (4.80), 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 (4.17), дає змогу за формулами (4.81) – (4.83) визначити оптимальні параметри налаштування PI та PD регуляторів. При цьому необхідно вибрати значення величин μ , k_1 , β і τ .

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

Вибір числового значення τ здійснено [66] у відповідності з умовою: $\frac{t_c}{6} < \tau < \frac{t_c}{3}$. При бажаному часі регулювання $t_c \sim 120$ с, маємо $20 < \tau < 40$. Було взято $\tau = 25$ с. Інші параметри були такими: $\mu = 0,2$; $k_1 = 1,5$.

З налізу формул (4.76) - (4.80) зроблений висновок, що на значення критерію (4.17) впливає величина β , яка визначає співвідношення між параметрами налаштування $C_0^{(1)}$ і $C_0^{(2)}$ PI та PD регуляторів. Для в'яснення 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 (4.45) та за формулами (4.80) – (4.84) 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. 4.16.

Мінімальному значенню $J(\beta)$ відповідає значення $\beta^* = 0,3280$ (рис. 4.16). Для визначеного значення β^* побудували графік (рис. 4.17) 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 $J(\alpha^*) = 28,779$.

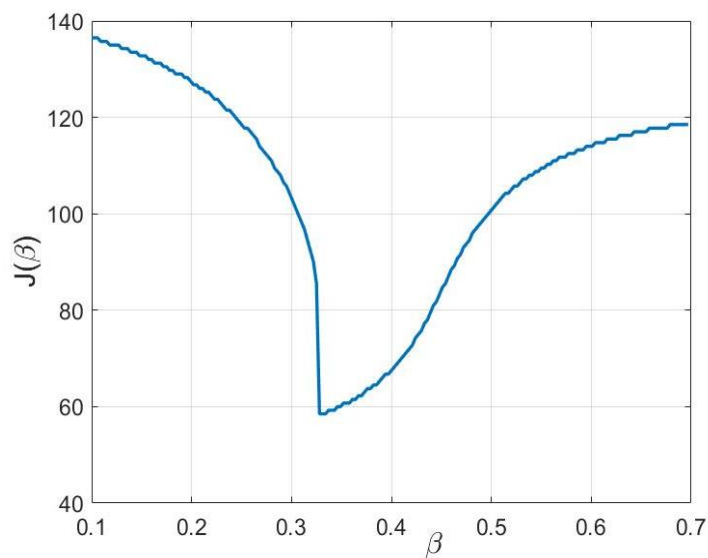


Рисунок 4.16 - Графік залежності часу регулювання t_c від співвідношення параметрів $\beta = C_0^{(2)} / C_0^{(1)}$

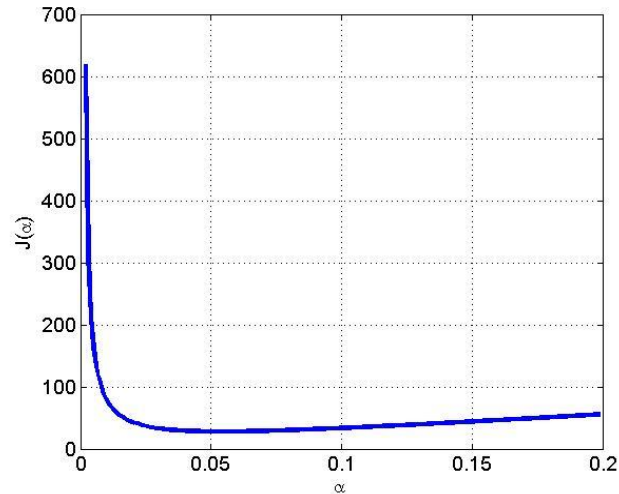


Рисунок 4.17 - Графік залежності $J(\alpha)$

Після підстановки значення α^* в формули (4.82) – (4.84) отримали параметри налаштування PI та PD регуляторів: $C_0^{(1)} = 4,9130 \cdot 10^2$; $C_0^{(2)} = 1,7294 \cdot 10^2$; $C_1 = 8,1669$; $C_2 = 1.1886 \cdot 10^4$.

Графік перехідного процесу замкненої системи керування (рис. 4.15) в координатах – завдання PI регулятора – вихід – зображений на рис. 4.18.

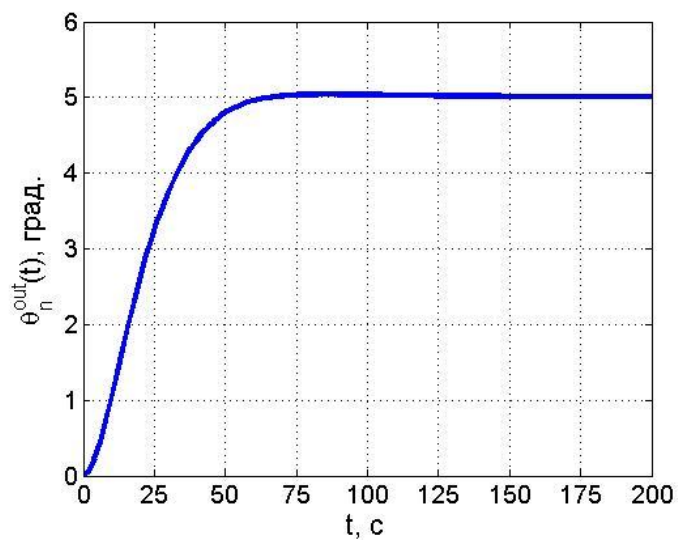


Рисунок 4.18 - Графік перехідного процесу замкненої системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти

За графіком перехідного процесу (рис. 4.18) визначили, що час регулювання $t_c = 58,5$ с, а перерегулювання – $\sigma = 0,6974\%$.

Порівнюючи отримані значення часу регулювання і перерегулювання з відповідними показниками якості процесу регулювання, які отримані для каскадно-зв'язаної системи, можна зробити висновок, що час регулювання збільшився з 48,2с до 58,5 с. У першому випадку перерегулювання склало 33,66%, а в другому випадку перерегулювання майже відсутнє.

Таким чином, можна стверджувати, що другий варіант реалізації системи автоматичного керування нагрівачем нафти забезпечує більш прийнятні показники процесу керування.

Аналіз структурної схеми нагрівача як об'єкта автоматичного керування (рис. 2.6) показав, що основними збуреннями, які впливають на роботу системи автоматичного керування є температура і витрата нафти на вході в нагрівач.

Подальше підвищення якості процесу керування температурним режимом нагрівача можливе шляхом синтезу інваріантної системи керування нагрівачем з проміжним теплоносієм.

4.5. Інваріантна система автоматичного керування нагрівачем з проміжним теплоносієм

З метою виявлення можливості покращення якості процесу керування створена інваріантна система автоматичного керування [68], структурна схема якої зображена на рис. 4.19. Система має у своєму складі дві підсистеми – стабілізації температури T_n^{out} ($y = T_n^{out}$) на виході нагрівника та компенсації збурень, які діють на об'єкт керування, якими є зміна витрати нафти, що поступає в нагрівник $f_1 = G_n$ та температура нафти на його вході $f_2 = T_n^{in}$.

Підсистема стабілізації температури T_n^{out} складається об'єкта керування з передавальною функцією $W_{ob}(s)$, пропорційно-інтегрального регулятора PI з

передавальною функцією $W_{PI}(s)$. Об'єкт керування охоплений місцевим від'ємним зворотним зв'язком, у коло якого включений пропорційно-диференційний регулятор PD з передавальною функцією $W_{PD}(s)$.

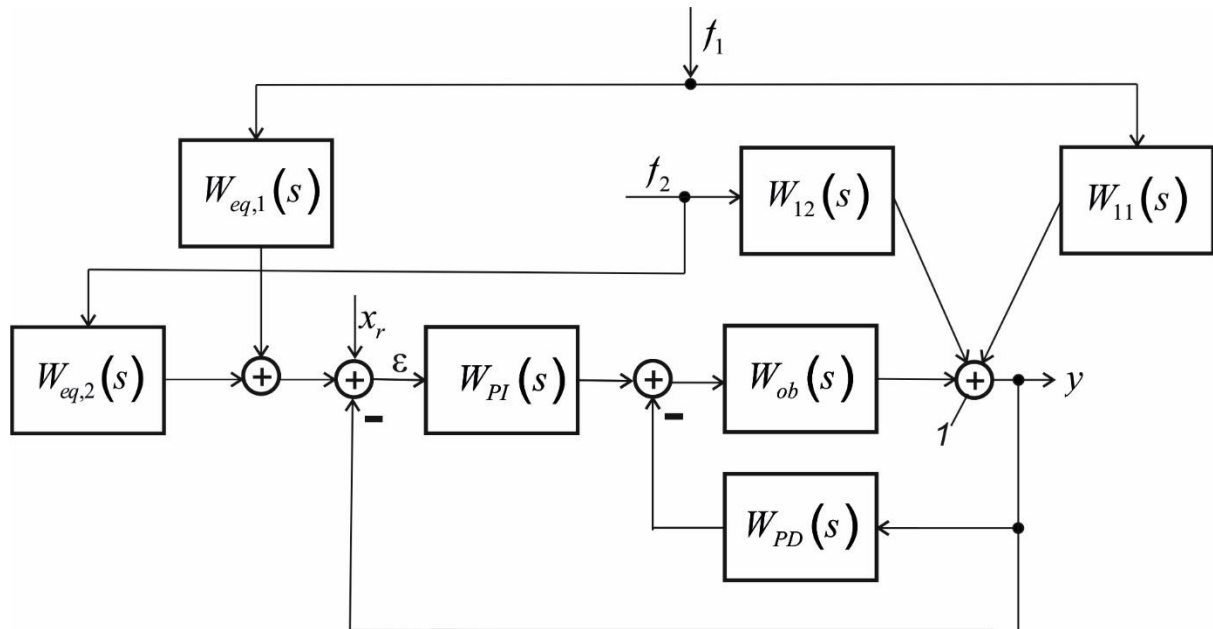


Рисунок 4.19 - Структурна схема інваріантної системи керування шляховим нагрівачем

Підсистему компенсації утворюють канали поширення збурень, які характеризуються передавальними функцією $W_{11}(s)$ і $W_{12}(s)$ та компенсатори збурень з передавальними функціями $W_{eq,1}(s)$ та $W_{eq,2}(s)$.

Виходячи із принципу суперпозиції, створена математичну модель інваріантної системи автоматичного керування (рис. 4.19)

$$Y(s) = W_{yx_r}(s)X_r(s) + W_{yf,1}(s)F_1(s) + W_{yf,2}(s)F_2(s), \quad (4.85)$$

де $W_{yx_r}(s)$ - передавальна функція підсистеми стабілізації температури T_n^{out} відносно вставки PI -регулятора; $W_{yf,1}(s)$ і $W_{yf,2}(s)$ - передавальні функції підсистеми компенсації збурення.

Підсистема компенсації збурень (рис. 4.19) повинна забезпечити інваріантність вихідної координати системи y по відношенню до збурень f_1 і f_2 . Це означає, що другий і третій доданки у правій частині рівняння (4.85) повинен перетворитись в нуль. Оскільки $f_1 \neq 0$ і $f_2 \neq 0$, то умови рівності нулю складових $W_{yf,1}(s)F_1(s)$ і $W_{yf,2}(s)F_2(s)$ в формулі (4.85) будуть мати місце тоді, коли $W_{yf,1}(s)=0$ і $W_{yf,2}(s)=0$. Виконання останніх умов забезпечується певним вибором $W_{eq,1}(s)$ і $W_{eq,2}(s)$ - передавальних функцій компенсаторів (рис. 4.20).

Для розв'язання поставленої задачі необхідно визначити передавальні функції $W_{yf,1}(s)$ і $W_{yf,2}(s)$. Для цього перенесемо суматор 1 через передавальну функцію $W_{ob}(s)$. Результат такого структурного перетворення зображений на рис. 4.20.

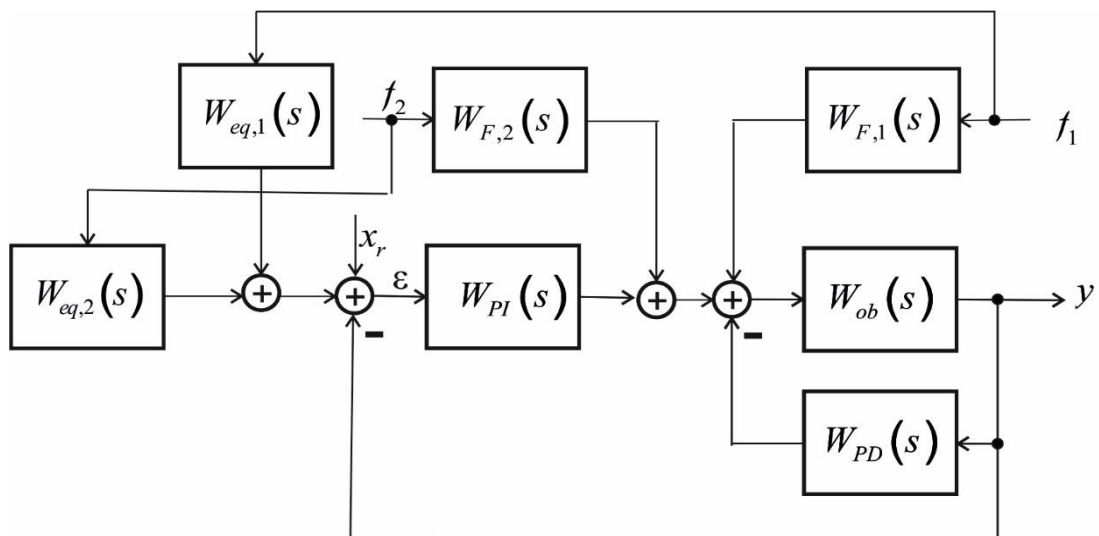


Рисунок 4.20 - Структурна схема інваріантної системи керування шляховим нагрівником після структурних перетворень

Внаслідок структурного перетворення (рис. 4.20) передавальні функції $W_{F,1}(s)$ і $W_{F,2}(s)$ будуть такими: $W_{F,1}(s) = \frac{W_{11}(s)}{W_{ob}(s)}$ і $W_{F,2}(s) = \frac{W_{12}(s)}{W_{ob}(s)}$.

Якщо скористатись принципом суперпозиції, то $W_{yf,1}(s)$ визначимо із рис. 4.19, поклавши у ньому $x_r = 0$ і $f_2 = 0$, а для визначення $W_{yf,2}(s)$ необхідно прирівняти до нуля величини $x_r = 0$ і $f_1 = 0$. У результаті отримаємо структурні схеми, які зображені на рис. 4.21.

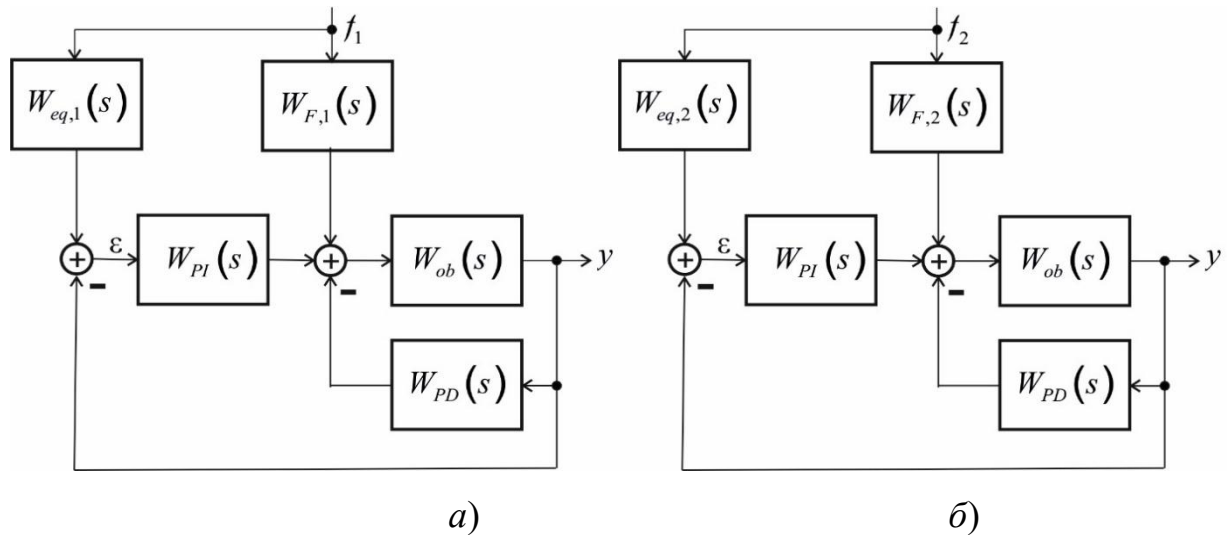
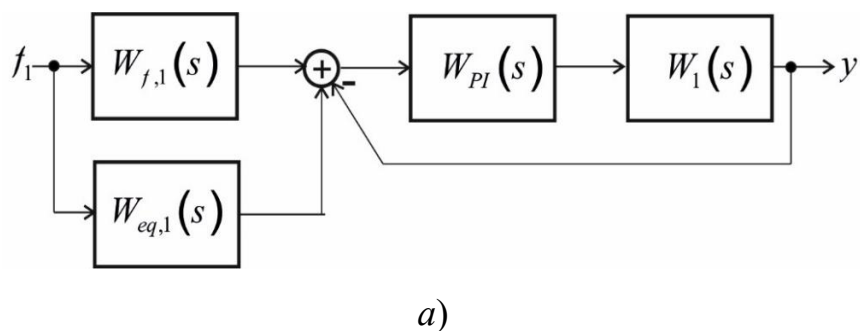
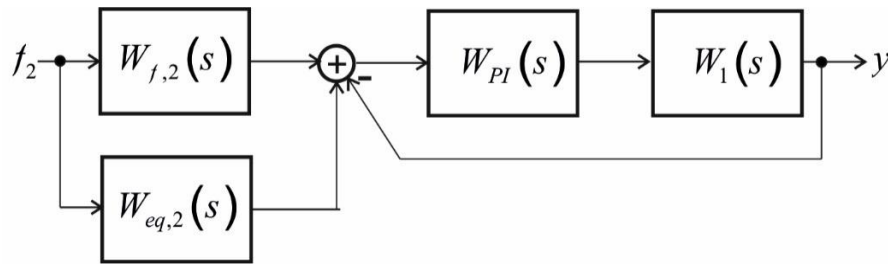


Рисунок 4.21 - Структурні схеми інваріантної системи керування (а, $x_r = 0$ і $f_2 = 0$; б, $x_r = 0$ і $f_1 = 0$)

Після перенесення суматорів за ходом сигналу через передавальну функцію $W_{PI}(s)$ (рис. 4.21) та після нескладних структурних перетворень, прийшли до структурних схеми, які зображені на рис. 4.22. Передавальні функції $W_{f,1}(s)$ і $W_{f,2}(s)$ (рис. 4.21) є такими: $W_{f,1}(s) = \frac{W_{F,1}(s)}{W_{PI}(s)}$ і

$$W_{f,2}(s) = \frac{W_{F,2}(s)}{W_{PI}(s)}.$$





б)

Рисунок 4.22 - Структурні схеми інваріантної системи після

перетворень: а) $x_r = 0$ і $f_2 = 0$; б) $x_r = 0$ і $f_1 = 0$;

З врахуванням значень $W_{F,1}(s)$ і $W_{F,2}(s)$, маємо: $W_{f,1}(s) = \frac{W_{11}(s)}{W_{ob}(s)W_{PI}(s)}$,

$$W_{f,2}(s) = \frac{W_{12}(s)}{W_{ob}(s)W_{PI}(s)}.$$

Із структурної схеми, яка зображена на рис. 4.22а знаходимо:

$$W_{yf,1}(s) = (W_{f,1}(s) + W_{eq,1}(s)) \frac{W_{PI}(s)W_1(s)}{1 + W_{PI}(s)W_1(s)},$$

а із рис. 4.22б маємо:

$$W_{yf,2}(s) = (W_{f,2}(s) + W_{eq,2}(s)) \frac{W_{PI}(s)W_1(s)}{1 + W_{PI}(s)W_1(s)},$$

$$\text{де } W_1(s) = \frac{W_{ob}(s)}{1 + W_{ob}(s)W_{PD}(s)}$$

Беручи до уваги величини $W_{f,1}(s)$, $W_{f,2}(s)$ і $W_1(s)$ приходимо до такого результату:

$$W_{yf,1}(s) = \frac{W_{11}(s) + W_{ob}(s)W_{PI}(s)W_{eq,1}(s)}{1 + W_{ob}(s)W_{PD}(s) + W_{PI}(s)W_{ob}(s)}, \quad (4.86)$$

$$W_{yf,2}(s) = \frac{W_{12}(s) + W_{ob}(s)W_{PI}(s)W_{eq,2}(s)}{1 + W_{ob}(s)W_{PD}(s) + W_{PI}(s)W_{ob}(s)}. \quad (4.87)$$

Оскільки умова інваріантності передбачає рівність нулю передавальних функцій $W_{yf,1}(s)$ і $W_{yf,2}(s)$, то із формули (4.86) і (4.87) випливає, що $W_{11}(s) + W_{ob}(s)W_{PI}(s)W_{eq,1}(s)W_{PI}(s) = 0$ і $W_{12}(s) + W_{ob}(s)W_{PI}(s)W_{eq,2}(s) = 0$.

Із останніх рівнянь знаходимо передавальні функції компенсаторів

$$W_{eq,1}(s) = -\frac{W_{11}(s)}{W_{ob}(s)W_{PI}(s)}, \quad (4.88)$$

$$W_{eq,2}(s) = -\frac{W_{12}(s)}{W_{ob}(s)W_{PI}(s)}. \quad (4.89)$$

Так як передавальна функція $W_{PI}(s)$ визначена формулою (4.86), то

$$W_{eq,1}(s) = -\frac{\beta_0 s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3}{\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3} \cdot \frac{(\alpha_0 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2)s}{k_s(C_0^{(1)}s + C_1)}, \quad (4.90)$$

$$W_{eq,2}(s) = -\frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \cdot \frac{(\alpha_0 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2)s}{k_s(C_0^{(1)}s + C_1)}. \quad (4.91)$$

Оскільки поліноми чисельників передавальних функцій (4.90) і (4.91) більші за їх знаменників, то компенсатори $Eq,1$ і $Eq,2$ (рис. 4.19) фізично нездійсненні. Тому для фізичної реалізації компенсаторів $Eq,1$ і $Eq,2$ необхідно понизити порядки поліномів чисельників передавальних функцій (4.90) і (4.91).

Таке зменшення поліномів чисельників передавальних функцій (4.90) і (4.91) здійснимо, виходячи із умови близькості частотних характеристик вихідних і редукованих передавальних функцій, які входять до складу виразів (4.88) і (4.89). Діапазон частот для відповідних передавальних функцій із формул (4.88) і (4.89) повинен належати діапазону частот $\omega \in [0; \omega_{cf}]$, де ω_{cf} - частота зрізу керованого об'єкта, з передавальною функцією $W_{ob}(s)$ (рис. 4.9).

На рис. 4.23 зображена частотна характеристика керованого об'єкта, із якого випливає, що $\omega_{cf} = 10^{-3} \text{ c}^{-1}$.

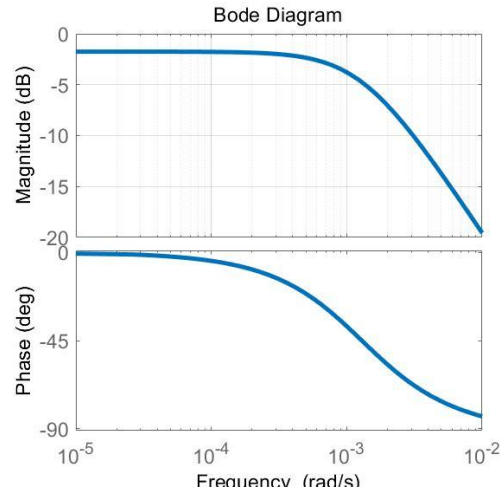


Рисунок 4.23 - Частотні характеристики керованого об'єкта

За методом площ [54] у формулі (4.88) була редукована передавальна функція $W_{11}(s)$, а у формулі (4.89) - $W_{ob}(s)$. Результати редукції передавальних функцій $W_{11}(s)$ і $W_{ob}(s)$ відображає рис. 4.24.

Із рис. 4.24 видно, що в діапазоні частот $\omega \in [0; \omega_{cf}]$ є задовільне наближення частотних характеристик вихідних і редукованих моделей, які представлені передавальними функціями $W_{11}(s)$ і $W_{ob}(s)$.

Отже, отримали такі редуковані моделі:

$$W_{11}^{(r)}(s) = \frac{k}{\pi_0^{(r)} s^2 + \pi_1^{(r)} s + \pi_2^{(r)}},$$

$$W_{ob}^{(r)}(s) = \frac{k_{ob}}{\alpha_0^{(r)} s + \alpha_1^{(r)}}.$$

Тепер для отримання передавальних функцій компенсатора необхідно в (4.89) і (4.90) $W_{11}(s)$ і $W_{ob}(s)$ замінити на $W_{11}^{(r)}(s)$ і $W_{ob}^{(r)}(s)$. У результаті отримали такі передавальні функції компенсаторів:

$$W_{eq,1}(s) = \frac{b_{eq,1}^{(0)} s^3 + b_{eq,1}^{(1)} s^2 + b_{eq,1}^{(2)} s + b_{eq,1}^{(3)}}{a_{eq,1}^{(0)} s^3 + a_{eq,1}^{(1)} s^2 + a_{eq,1}^{(2)} s + a_{eq,1}^{(3)}}, \quad (4.92)$$

$$W_{eq,2}(s) = \frac{b_{eq,2}^{(0)}s^4 + b_{eq,2}^{(1)}s^3 + b_{eq,2}^{(2)}s^2 + b_{eq,2}^{(3)}s + b_{eq,2}^{(4)}}{a_{eq,2}^{(0)}s^4 + a_{eq,2}^{(1)}s^3 + a_{eq,2}^{(2)}s^2 + a_{eq,2}^{(3)}s + a_{eq,2}^{(4)}}, \quad (4.93)$$

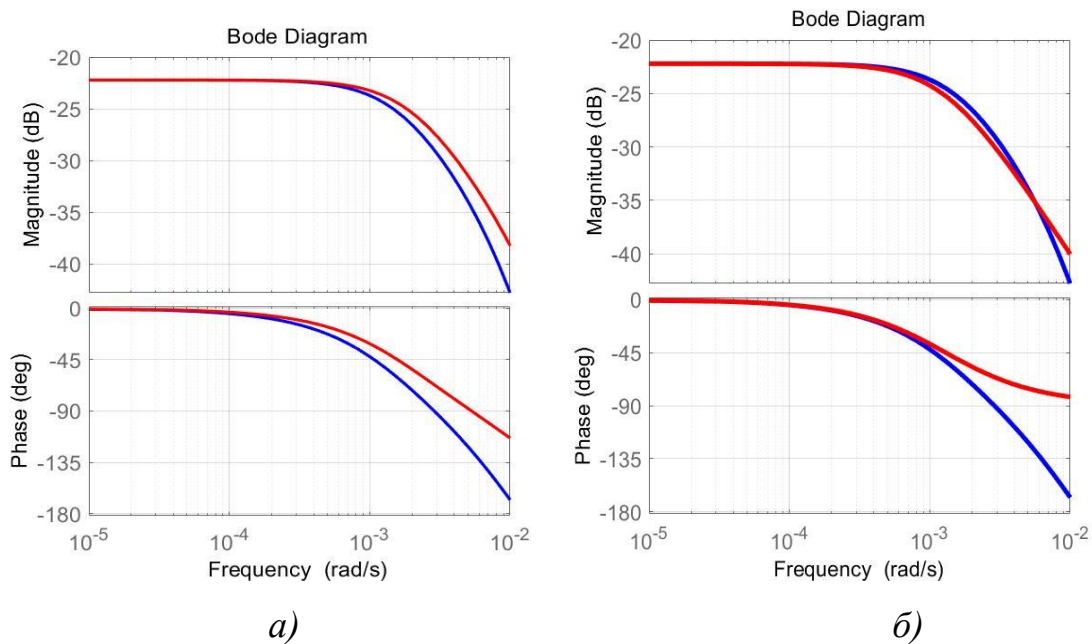


Рисунок 4.24 - Частотні характеристики «оригінальних» і редукованих передавальних функцій $W_{11}(s)$ (а) і $W_{ob}(s)$ (б)

де $b_{eq,1}^{(0)} = 1.3387$, $b_{eq,1}^{(1)} = 7.3190 \cdot 10^{-1}$, $b_{eq,1}^{(2)} = 9.4824 \cdot 10^{-4}$, $b_{eq,1}^{(3)} = 0$,
 $a_{eq,1}^{(0)} = 77.898$, $a_{eq,1}^{(1)} = 1.6997$, $a_{eq,1}^{(2)} = 8.3925 \cdot 10^{-3}$, $a_{eq,1}^{(3)} = 1.8427 \cdot 10^{-5}$;
 $b_{eq,2}^{(0)} = 7.2830 \cdot 10^4$, $b_{eq,2}^{(1)} = 3.7804 \cdot 10^3$, $b_{eq,2}^{(2)} = 5.1579$, $b_{eq,2}^{(3)} = 4.3420 \cdot 10^{-4}$, $b_{eq,2}^{(4)} = 0$,
 $a_{eq,2}^{(0)} = 9.4835 \cdot 10^3$, $a_{eq,2}^{(1)} = 8.4643 \cdot 10^2$, $a_{eq,2}^{(2)} = 17.073$, $a_{eq,2}^{(3)} = 9.5387 \cdot 10^{-2}$,
 $a_{eq,2}^{(4)} = 1.5038 \cdot 10^{-6}$.

Перевірку працездатності синтезованої інваріантної системи здійснено шляхом імітаційного моделювання в середовищі MatLab/Simulink.

Передавальна функція по каналу «температура нафти на виході – командний сигнал виконавчого пристрою»

$$W_{ob}(s) = \frac{k_s}{\alpha_0 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2}.$$

Передавальна функція по каналу «зміна витрати нафти на вході - температура нафти на виході»

$$W_{11}(s) = \frac{\beta_0 s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3}{\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3}$$

«температура нафти на вході - температура нафти на виході»

$$W_{12}(s) = -\frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3},$$

Графічна модель інваріантної системи (рис. 4.25) створена у відповідності із структурною схемою, яка зображена на рис. 4.19.

На вхід моделі подавались сигнали із блоків Source-1 і Source-2. Блок Source-1 реалізував таку стрибкоподібну функцію: $x_r = 5 \cdot 1(t)$. За допомогою блока Source-2 на другий вхід моделі подавалось збурення у вигляді синусоїдальної функції - $f(t) = A \sin(\omega t)$, де $A = 100$, $\omega = 0,5 c^{-1}$. Таке значення амплітуди A зумовлено значною інерційністю каналу передачі збурення з входу об'єкта на його вихід. Графіки сигналів на вході і виході блоку $W_{yf,1}(s)$, зображені на рис. 4.26.

Синусоїдальна форма сигналу $f_i(t)$, $i = 1, 2$ вибрана з метою демонстрації інваріантності системи до збурення, яке постійно змінюється в часі. При проходженні сигналу $f_i(t)$, $i = 1, 2$, наприклад, через блок 2 (рис. 4.25) відбувається зміна його амплітуди в часі (рис. 4.26, б), яка зумовлена динамічними властивостями блоку 2.

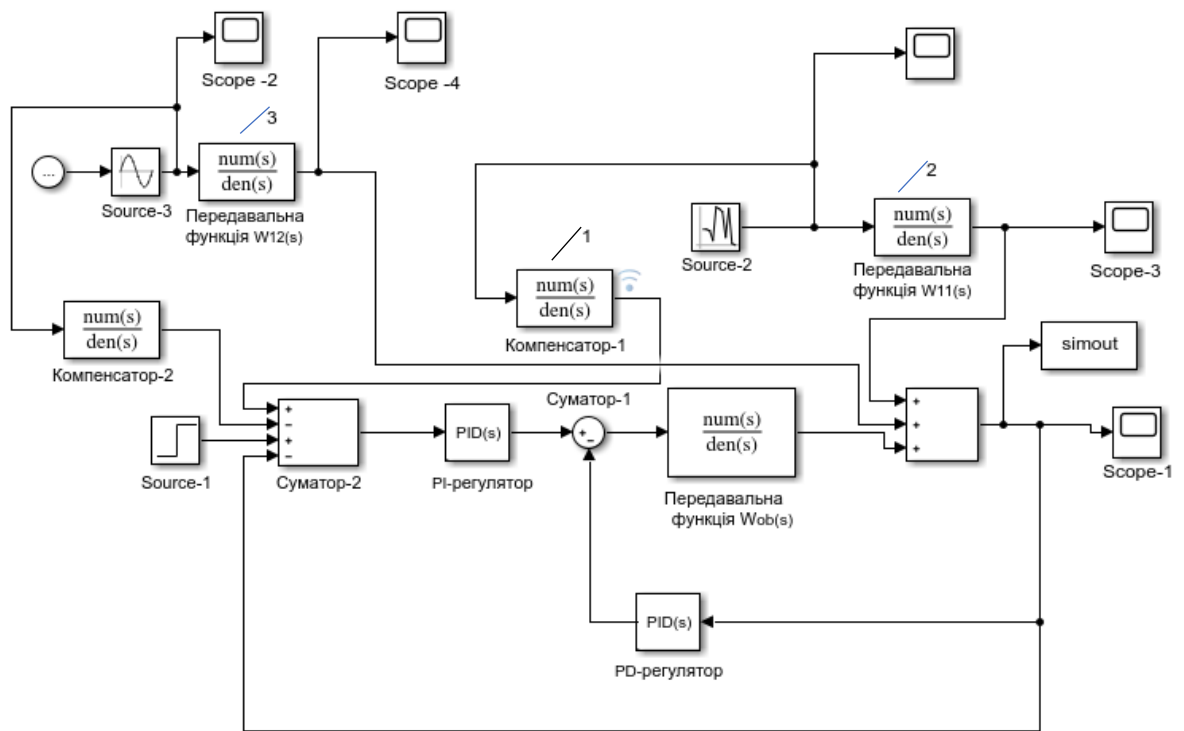


Рисунок 4.25 - Графічна модель інваріантної системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику

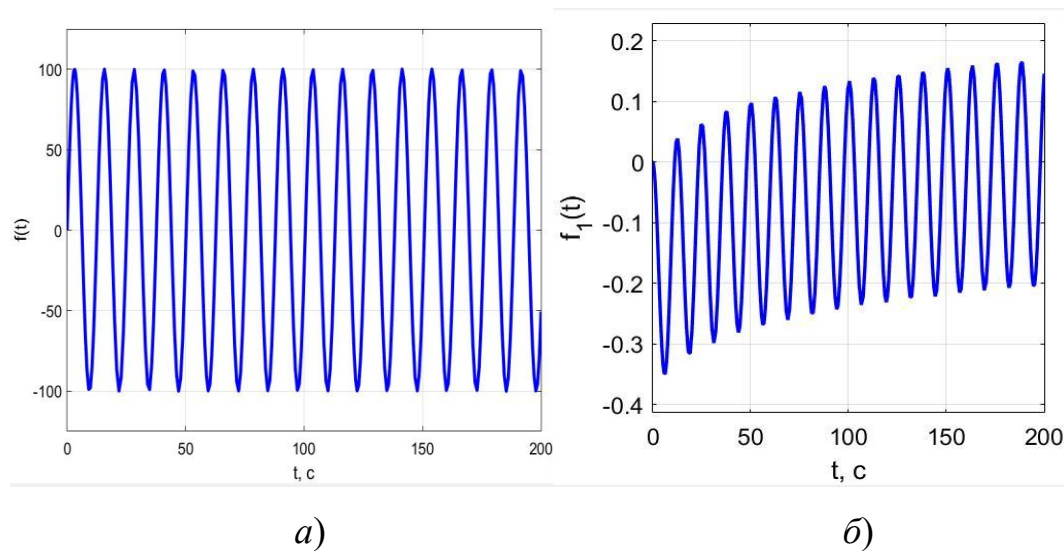


Рисунок 4.26 - Сигнали на вході (а) і виході (б) блоку 2 з передавальною функцією $W_{yf,1}(s)$

Імітаційне моделювання проводили за таким планом. При значенні $f_i(t) = 0$, $i = 1, 2$ - збурення відсутнє – за допомогою створеної Simulink-моделі (рис.4,26) отримали графік перехідного процесу; потім подали на вхід блоків 2 і

3 збурення $f_i(t) = A_i \sin(\omega_i t)$, $i = 1, 2$ і зафіксували графік перехідного процесу.

У першому і другому дослідженні x_r залишалось незмінним.

Другий комп'ютерний експеримент здійснений шляхом подачі випадкового гаусівського процесу на вхід блоків 2 і 3. На рис. 4.27а, як приклад, зображений сигнал, який поступав на вхід блоку 2, а на рис. 4.27б зображений сигнал на його виході.

Результат імітаційного моделювання інваріантної системи автоматичного керування відображено на рис. 4.27.

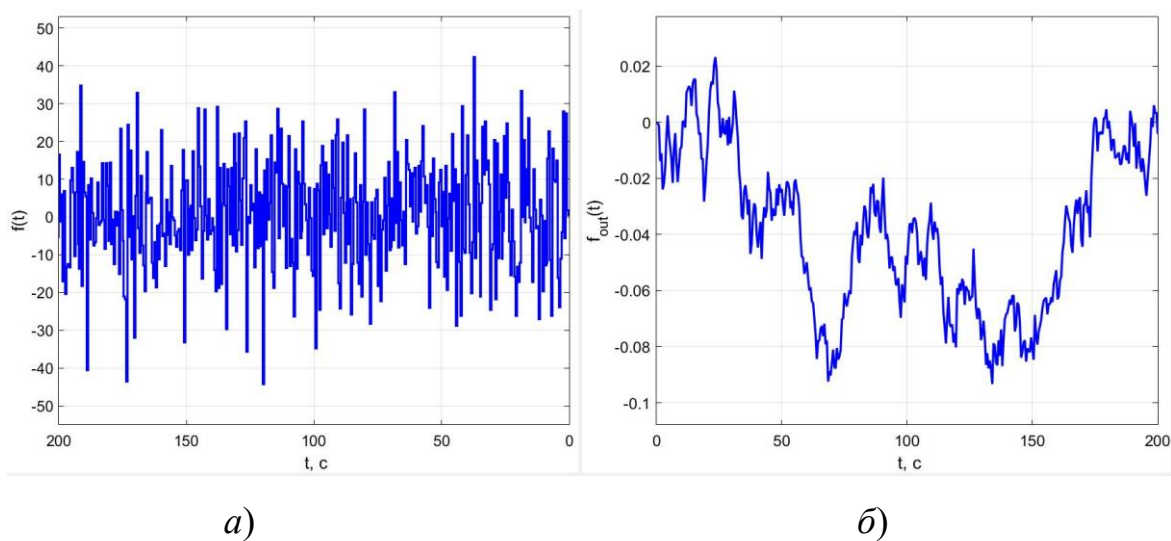


Рисунок 4.27 - Випадкові сигнали на вході (а) і виході (б) блоку 2 з передавальною функцією $W_f(s)$

Аналіз результатів імітаційного моделювання показали, що наявність контурів передач збурень по каналах, які включають компенсатори $W_{eq,1}(s)$ і $W_{eq,2}(s)$, забезпечують інваріантність системи по відношенню до збурень – зміна витрати подачі нафти в шляховий нагрівач і температура на його вході. Ілюстрацією такого твердження є рис. 4.28, на якому зображені перехідні характеристики інваріантної системи для двох випробувань. У першому випробуванні відсутні збурення, а в другому – збурення у вигляді синусоїдальної функції та випадкового гаусового процесу, які діяли на систему.

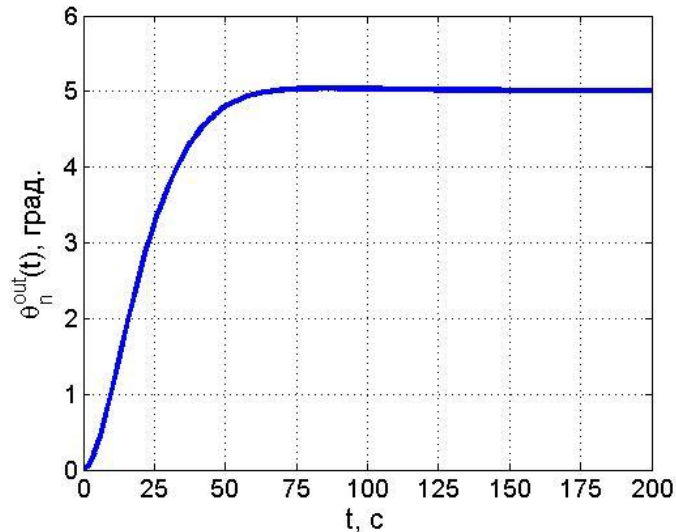


Рисунок 4.28 - Результат імітаційного модулювання інваріантної системи автоматичного керування

Отримані перехідні характеристики демонструють високу ступінь збігу, що свідчить про інваріантність системи при змінному в часі сигналах $f_1(t)$ і $f_2(t)$.

Для практичної реалізації коректорів необхідно передавальні функції (4.92) і (4.93) перетворити у дискретну форму. У результаті такого перетворення отримали такі передавальні функції:

$$H_{eq.2}(z) = \frac{2.207 \cdot 10^{-2} - 5.69 \cdot 10^{-2} z^{-1} + 4.76 \cdot 10^{-2} z^{-2} - 1.277 \cdot 10^{-2} z^{-3}}{1 - 2.978 z^{-1} + 2.957 z^{-2} - 0.9784 z^{-3}}; \quad (4.94)$$

$$H_{eq.1}(z) = \frac{7.68 - 30.33 z^{-1} + 44.91 z^{-2} - 29.56 z^{-3} + 7.292 z^{-4}}{1 - 3.913 z^{-1} + 5.74 z^{-2} - 3.742 z^{-3} + 0.9146 z^{-4}}. \quad (4.95)$$

Для забезпечення стійкості коректорів необхідно правильно вибрати крок квантування t_0 . Для розглянутих каналів впливу за крок квантування можна прийняти $t_0 = 1c$, що дозволить зсунути полюси передавальних функцій (4.94) і (4.95) від межі одиничного кола і цим забезпечити стабільність реалізації цифрового еквівалента коректора з врахуванням одинарної точності розрахунків.

Співвідношення вхід/вихід лінійної дискретної системи (ЛДС) пов'язане з його передавальною функцією в Z -області і має вигляд різницевого рівняння (РР):

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} c_i x(n-i) - \sum_{k=1}^{M-1} d_k y(n-k), \quad (4.96)$$

де c_i, d_k - раціональні коефіцієнти РР - параметри ЛДС; i, k - значення затримок впливу та реакції; $(N-1), (M-1)$ — константи, що визначають максимальні затримки.

Можна реалізувати цифровий коректор декількома способами [67]:

- пряма реалізація за різницеvim рівнянням (4.96), для невисоких порядків коректора;
- розклад в каскадну форму з використанням множників другого порядку;
- представлення в паралельну форму з використанням доданків першого та другого порядку.

Розглянемо варіант представлення (4.94) і (4.95) добутком множників другого порядку:

$$H(z) = \prod_{k=1}^L \frac{c_{0k} + \tilde{c}_{1k} z^{-1} + \tilde{c}_{2k} z^{-2}}{1 + d_{1k} z^{-1} + d_{2k} z^{-2}}, \quad (4.97)$$

де $c_{0k}, \tilde{c}_{1k}, \tilde{c}_{2k}, d_{1k}, d_{2k}$ - раціональні коефіцієнти рекурсивних ланок 2-го порядку, які називають біквдратними; L - кількість ланок.

Кількість ланок L визначають за такою формулою:

$$L = \text{int} \left(\frac{M-1}{2} \right),$$

де int - функція округлення до найближчого цілого у бік збільшення.

Каскадній структурі з біквдратних ланок відповідає подання передавальної функції у вигляді залежності (4.97):

$$H(z) = G \prod_{k=1}^L \frac{1 + c_{1k} z^{-1} + c_{2k} z^{-2}}{1 + d_{1k} z^{-1} + d_{2k} z^{-2}}, \quad (4.98)$$

$G = c_{01} \cdot c_{02} \cdot \dots \cdot c_{0L}$ - коефіцієнт підсилення, а відповідні коефіцієнти пов'язані співвідношеннями: $c_{1k} = \tilde{c}_{1k} / c_{0k}$; $c_{2k} = \tilde{c}_{2k} / c_{0k}$.

Результати розкладу на секції передавальних функцій коректорів (4.94) і (4.95) представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Параметри представлення $H_{eq.1}(z)$ та $H_{eq.2}(z)$ біквadratними секціями

Секція, k	c_{0k}	c_{1k}	c_{2k}	d_{0k}	d_{1k}	d_{2k}
Коректор $H_{eq.1}(z)$, $G_{eq.1} = 2.2068e - 02$						
1	1	-0.5796	0	1	-0.9841	0
2	1	-1.9987	0.9987	1	-1.9942	0.9942
Коректор $H_{eq.2}(z)$, $G_{eq.2} = 7.6797$						
1	1	-1.9508	0.9508	1	-1.9227	0.9237
2	1	-1.9986	0.9986	1	-1.9901	0.9901

Для автоматизації шляхового підігрівника нафти вибрано PLC Modicon M172 із оновленої лінійки контролерів M171/M172/M173 компанії *Schneider Electric*, які застосовують для керування HVAC системами (опалення, вентиляція, кондиціювання), комерційними машинами та іншим технологічним обладнанням середньої складності. Контролер з модулями розширення може підтримувати до 238 аналогових та дискретних входів/виходів, має широку номенклатуру інтерфейсів (CAN, RS485 та Ethernet), та вбудований дисплей. Все це дозволяє інтегрувати його в комп'ютерно інтегровані системи керування на промислах. Для програмування PLC M172 застосовують всі п'ять стандартизованих мов програмування міжнародного стандарту IEC 61131-3.

Аналіз програмної реалізації типових схем компенсаторів на базі різницевих рівнянь показує, що для цього необхідні певні базові алгоритми з бібліотеки PLC, а саме: багатоканальних суматорів, блоки множення та ланцюжки буферних елементів запам'ятовування для вхідних та вихідних

сигналів (зсувні регістри типу FIFO). У бібліотеці базових алгоритмів PLC M172 відсутні функціональні блоки зсувних регістрів FIFO, що ускладнює пряму реалізацію коректора.

Але інтегроване середовище розробки PLC EcoStruxure Machine Expert - HVAC підтримує можливість розробляти потрібний алгоритм високорівневою мовою ST, або використовувати її для програмування власних блоків користувача.

Тому для реалізації каскадної структури коректора з біквадратних ланок доцільно створити власний функціональний блок користувача для реалізації різницевого рівняння

$$y(n) = G(c_0x(n) + c_1x(n-1) + c_2x(n-2) - d_1y(n-1) - d_2y(n-2)), \quad (4.99)$$

З кожним заданим періодом квантування у функціональному блоці підраховується вихід секції за рівнянням (4.99) та запам'ятовуються в регістрах FIFO попередні значення входів та виходів з відповідним зсувом.

Функціональний блок секції *FIL* (рис. 4.29) програмно реалізований текстовою мовою ST. Входами блоку є відповідні матриці коефіцієнтів *C* і *D* та підсилення каналу *G*. Оскільки такт роботи контролера 0.1 с, а підрахунки в секції треба виконувати з періодом квантування 1с введено ще один вхід, за яким відслідковується кратність тактів контролера. В секції реалізовано також регістри *FIFO* для змінних *x* та *y* у вигляді векторів

$$X\{x[0.1nh], x[0.1(n-1)h], x[0.1(n-2)h]\},$$

$$Y\{y[0.1nh], y[0.1(n-1)h], y[0.1(n-2)h]\}.$$

Коректор відтворений графічною мовою *FBD* (рис. 4.29) і складається з послідовно включених екземплярів розробленого блоку *FIL*. На вхід першого блоку *fil_2* подаються необхідні параметри для першої секції коректора $H_{eq,1}(z)$ (табл. 4.1). До входу *X* підведене каліброване цифрове значення від давача температури нафти на вході підігрівника. Давач підключений до

апаратного модуля аналогового входу. Константа на вході $G=1$. Змінна $h1=10$ відповідає за такт роботи коректора з періодом 1с.

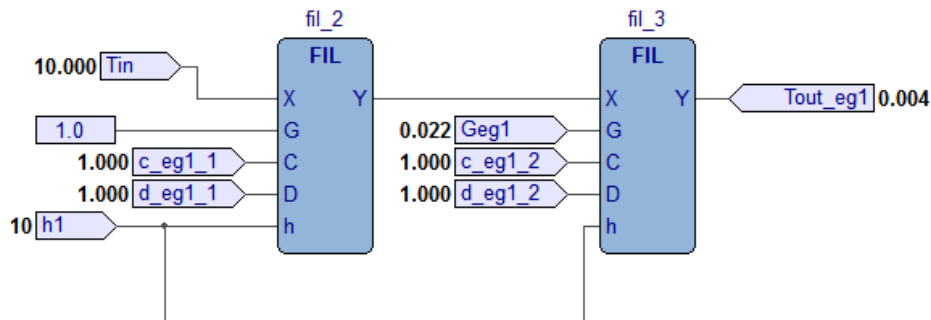
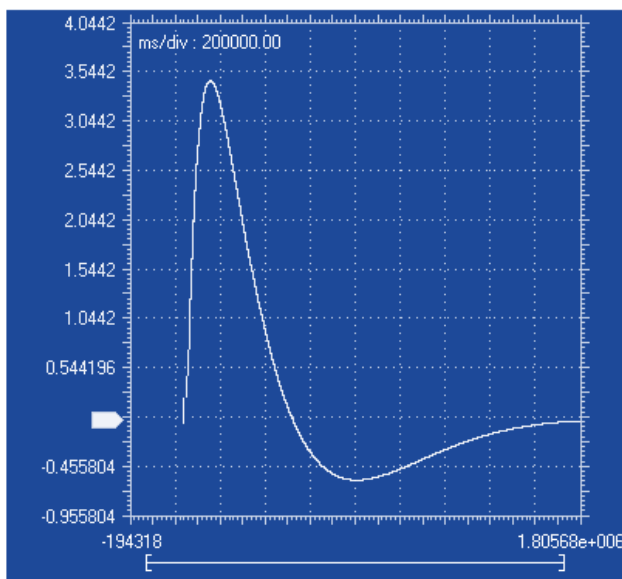


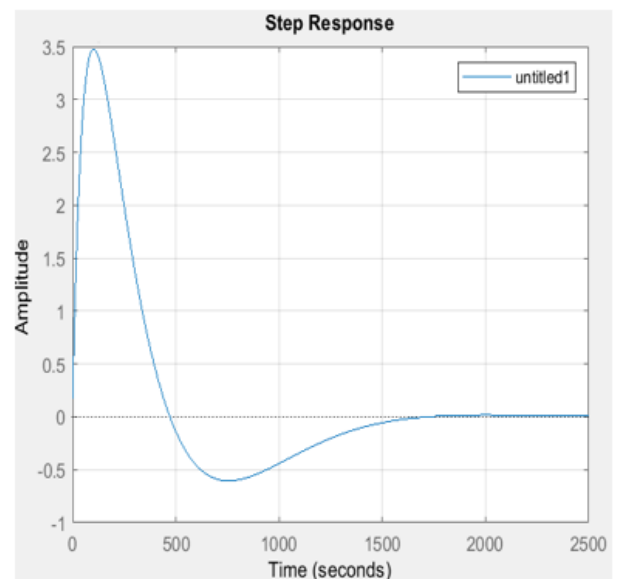
Рисунок 4.29 - Реалізація та перевірка роботи коректора $H_{eq.1}(z)$.

Екземпляр функціонального блоку *fil_3* реалізує другу біквadratну секцію коректора з набором відповідних параметрів. Змінна *Geg1* рівна коефіцієнту посилення коректора. Вихідна змінна *Tout_eg1* є сигналом корекції для компенсації впливу зміни параметра *Tin* на систему автоматичного керування температурою нафти.

Результати тестування роботи коректора з використанням *Oscilloscope* середовища розробки EcoStruxure Machine Expert – HVAC зображені на рис. 4.30.



а)



б)

Рисунок 4.30 - Результати тестування роботи коректора $H_{eq.1}(z)$:

а)- цифрова реалізація коректора на PLC M172; б) - реалізація в неперервній області.

Аналогічно програмно реалізований цифровий коректор $H_{eq.2}(z)$. Відповідні параметри треба підібрати з табл. 4.1, а на вхід коректора необхідно подати цифровий еквівалент сигналу від давача витрати нафти на вході у підігрівник.

Таким чином, інваріантна система автоматичного керування нагрівачем з проміжним теплоносієм, яка має у своєму складі синтезований компенсатор зовнішніх впливів, є нечутливою до зміни зовнішніх впливів – температури і витрати нафти на вході в нагрівач.

Висновки до розділу

1. Синтезована одноконтурна система за основним каналом «подача паливного газу – температура нафти на виході», яка, крім об'єкта керування, має у своєму складі давач температури, ПІ-регулятор і виконавчий пристрій. Параметри налаштування ПІ-регулятора обчислені в результаті розв'язання оптимізаційної задачі з узагальненим критерієм якості керування. Зроблені розрахунки установили, що при відсутності перерегулювання час регулювання становить 4200 с, що є неприйнятним.

2. Запропонована каскадно-зв'язана система автоматичного керування нагрівачем з проміжним теплоносієм, крім основного контуру, має у своєму складі допоміжний контур «подача паливного газу – температура димових газів», який має значно меншу інерційність у порівнянні з основним контуром. Обчислення параметрів налаштування регуляторів основного і допоміжного контурів здійснено за допомогою розробленого узагальненого методу пошуку оптимальних налаштувань регуляторів. Комп'ютерне моделювання каскадно-зв'язаної системи керування показало істотне зменшення часу регулювання до

48,2 с при збільшенні перерегулюванні до 33,7%. Таке значення перерегулювання може бути неприйнятним в реальних умовах.

3. Покращення якості процесу керування було досягнуто за допомогою структурно-параметричного рішення шляхом включення в основний контур керування, який вміщує ПІ-регулятор, додатково ПД-регулятора паралельно з об'єктом керування. Параметри налаштування ПІ/ПД-регуляторів обчислені за допомогою розробленого узагальненого методу, в основі якого лежить такий вибір коренів характеристичного рівняння системи, щоб квадратичний критерій якості керування набув мінімального значення. Доказано, що використання розробленого методу дало змогу значно зменшити час регулювання (до 58,5 с) у порівнянні з одноконтурною системою при відсутності перерегулювання. При відсутності перерегулювання час регулювання дещо збільшився у порівнянні з каскадно-зв'язаною системою, що зумовлює вибір системи з ПІ/ПД-регулятором як основної.

4. Усунення негативного впливу збурень – температури і витрати нафти на вході в нагрівач - на якість процесу керування досягнуто шляхом синтезу інваріантної системи керування основним елементом якої є компенсатор збурень. Показано, що фізична реалізація компенсатора збурень можлива за умови редукції моделей передавальних функцій збурень. Імітаційне модулювання інваріантної системи в середовищі MatLab дало змогу встановити, що відбувається повна компенсація збурень при синусоїдальному сигналові і при випадковому сигналові з гаусовим розподілом.

5. На засобах мікропроцесорної техніки реалізований компенсатор збурень як цифровий коректор. Результати тестування роботи коректора з використанням *Oscilloscope* середовища розробки EcoStruxure Machine Expert – HVAC довели правильність прийнятих рішень при переході від неперервного представлення моделі компенсатора до її дискретного аналогу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі проведених теоретичних досліджень та імітаційного моделювання розв'язана актуальна науково-технічна задача, суть якої у розробленні математичної моделі нагрівника нафти з водяною банею і створенні інваріантної системи автоматичного керування процесом нагріву нафти в непрямому нагрівачі.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи характеризуються такими висновками:

1. Непрямі нагрівачі нафти і природного газу використовують для попереднього нагріву робочого тіла (нафти або природного газу) для запобігання утворення гідратів (при пониженні тиску газу) або з метою уникнення відкладень парафіну і зменшення в'язкості при транспортуванні нафти трубопровідними системами.

Аналіз літературних джерел за напрямком дисертаційної роботи показав, що основні дослідження велись в трьох напрямках: збільшення коефіцієнта теплопровідності рідини, якою заповнена баня непрямого нагрівача, пошук шляхів підвищення теплового коефіцієнта корисної дії (ККД) нагрівачів та удосконалення систем керування процесом нагріву робочого тіла.

Підвищити коефіцієнт теплопровідності проміжного теплоносія автори досліджень пропонують додавати до проміжного теплоносія наночастинки розміром до 10 нм і різної концентрації.

Шляхом певних конструктивних змін нагрівачів таких як використання теплових трубок, попередній підігрів повітря для спалювання паливного газу, регулювання довжини полум'я горілки, використання сонячної енергії для попереднього підігріву газу, дає змогу підвищити загальний ККД непрямих нагрівачів з проміжним теплоносієм.

Реалізація першого і другого напрямку досліджень вимагає додаткових фінансових затрат для внесення змін в конструкцію існуючих непрямих нагрівачів.

Третій напрямок досліджень передбачає удосконалення працюючих систем автоматизації, суть якого в визначенні критичної температури природного газу, при якій не відбувається процес утворення гідратів.

Математичні моделі, які автори використовують для розв'язання поставлених задач, є статичними моделями і не враховують динамічні властивості непрямих нагрівачів з проміжними теплоносієм, що не дає змоги оцінити достовірність прийнятих рішень.

Тому дослідження направлені на створення математичних моделей нагрівачів з проміжним теплоносієм та на синтез ефективних систем керування процесом нагріву є актуальною і має теоретичне та практичне значення.

2. З використанням закону збереження кількості енергії створена математична модель нагрівача з проміжним теплоносієм як об'єкта автоматичного керування, яка враховує теплообмінні процеси між всіма елементами нагрівача. Аналіз створеної математичної моделі дав змогу виявити вхідні і вихідні величини об'єкта. До вихідних величин віднесені температура нафти на виході із нагрівача і температура димових газів, а вхідні величини - це керуюча дія (подача паливного газу) та збурення (зміна температура і витрати нафти на вході в нагрівач).

Виходячи із допущення, що відхилення як вхідних, так і вихідних величин від усталених значень невеликі, отримана лінеаризована математична модель нагрівача у вигляді системи диференціальних рівнянь та передавальних функцій, що дало змогу створити структурну схему і виявити внутрішні зв'язки між елементами нагрівача.

Аналіз отриманих передавальних функцій нагрівача нафти показав, що вони мають восьмий порядок, що значно ускладнює процес синтезу автоматичних систем керування процесом нагріву нафти. За допомогою методу редукції Генкеля порядок передавальних функцій знижений до трьох і двох без помітної втрати точності в діапазоні пропускання частот.

3. На основі структурної схеми нагрівача з проміжним теплоносієм синтезовані три варіанти систем автоматичного керування процесом нагрівання

нафти – одноконтурна, каскадно-зв'язана та інваріантна структурно-параметрична система.

Одноконтурна система автоматичного керування має у своєму складі, крім керованого об'єкта, ПІ-регулятор, параметри налаштування якого обчислені за узагальненим квадратичним критерієм. Зроблені розрахунки показали, що при відсутності перерегулювання час регулювання становить 4200 с, що є неприйнятним.

Запропонована каскадно-зв'язана система автоматичного керування нагрівачем з проміжним теплоносієм, крім основного контуру, має у своєму складі допоміжний контур «подача паливного газу – температура димових газів», який має значно меншу інерційність у порівнянні з основним контуром. Обчислення параметрів налаштування регуляторів основного і допоміжного контурів здійснено за допомогою розробленого комбінованого методу пошуку оптимальних налаштувань регуляторів. Комп'ютерне моделювання каскадно-зв'язаної системи керування показало істотне зменшення часу регулювання до 48,2 с при збільшенні перерегулюванні до 33,7%. Таке значення перерегулювання може бути неприйнятним в реальних умовах.

Покращення якості процесу керування було досягнуто за рахунок включення в основний контур керування паралельно об'єкту керування ПД-регулятора. На основі розробленого методу визначені параметри налаштування ПІ/ПД-регуляторів за узагальненим квадратичним критерієм. Оскільки на об'єкт діють зовнішні збурення, то для покращення якості процесу керування синтезована інваріантна структурно-параметрична система, яка має у своєму складі компенсатор зовнішніх збурень. Імітаційне модулювання інваріантної структурно-параметричної системи дало змогу встановити, що відбувається повна компенсація збурень при синусоїдальному сигналові і при випадковому сигналові з гаусовим розподілом.

Доказано, що використання розробленого методу дало змогу значно зменшити час регулювання (до 58,5 с) у порівнянні з одноконтурною системою при відсутності перерегулювання. При відсутності перерегулювання час

регулювання дещо збільшився у порівнянні з каскадно-зв'язаною системою, що зумовлює вибір системи з ПП/ПД-регулятором як основної.

4. Відомі методи налаштування ПП/ПД-регуляторів ґрунтуються на мінімізації узагальненого критерію оптимальності при обмеженнях, які витікають із умов стійкості системи керування. Розв'язок такої задачі методами нелінійного програмування не дає задовільних результатів, оскільки частина обмежень в процесі розв'язання задачі стають активними, що переводить стан системи на межу стійкості.

Розроблено комбінований метод налаштування параметрів ПП/ПД-регуляторів, який є комбінацією методу s - площин і методу, який ґрунтується на мінімізації узагальненого квадратичного критерію якості. Суть методу у тому, що на комплексній площині вибирається таке розміщення коренів характеристичного рівняння, щоб система керування була б стійкою. Крім того корені характеристичного рівняння вибирають так, щоб узагальнений квадратичний критерій був функцією тільки від дійсної частини одного із коренів характеристичного рівняння. Внаслідок отримаємо одновимірну задачу мінімізації, локальний мінімум якої шукався на заздалегідь визначеному інтервалі пошуку. Такий інтервал вибирали з умови, щоб параметри налаштування ПП/ПД-регуляторів були б строго додатними, що гарантує стійкість замкненої системи автоматичного керування.

Створений комбінований метод налаштування ПП/ПД-регуляторів дав змогу визначити оптимальні параметри регуляторів і вибрати із розроблених варіантів систем керування процесом нагрівання нафти в нагрівачі з проміжним теплоносієм оптимальний за узагальненим квадратичним критерієм. Доказано, що такою системою є інваріантна структурно-параметрична система автоматичного керування процесом нагрівання нафти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. S. H. Azizi, A. Rashidmardani and M. R. Andalibi, "Study of Preheating Natural Gas in Gas Pressure Reduction Station by the Flue Gas of Indirect Water Bath," *Int. J. Sci. Eng. Invest.*, vol. 3, no. 27, pp. 17–22, Apr. 2014.
2. "Water Bath Heater," *SPEC Oil & Gas*. [Онлайн]. Доступно: <https://specoilandgas.com/water-bath-heater.html> (Дата звернення: 11.04.2025).
3. "The importance of water bath heaters in the oil and gas industry," *HC Petroleum Equipment*. [Онлайн]. Доступно: <https://hcpetroleum.hk/news-detail/383> (Дата звернення: 11.04.2025).
4. A. R. Rahmati and M. Reiszadeh, "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," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 134, pp. 107–117, May 2018.
5. A. Rashidmardani and M. Hamzei, "Effect of Various Parameters on Indirect Fired Water Bath Heater Efficiency to Reduce Energy Losses," *Int. J. Sci. Eng. Invest.*, vol. 2, no. 12, pp. 17–24, Jan. 2013.
6. S. A. Mostafavi and M. Shirazi, "Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption," *Energy*, vol. 212, p. 118742, Dec. 2020.
7. A. A. Delouei, H. Naeimi, H. Sajjadi, M. Atashafrooz, M. Imanparast and A. J. Chamkha, "An active approach to heat transfer enhancement in indirect heaters of city gate stations: An experimental modeling," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 237, p. 122283, Jan. 2024.
8. "Why Use Thermal Fluid Heating Systems Instead of Water Bath Heaters?" *Sigma Thermal*. [Онлайн]. Доступно: <https://www.sigmathermal.com/blog/why-use-thermal-fluid-heating-systems-instead-of-water-bath-heaters/> (Дата звернення: 11.04.2025).

9. H. Li, L. Wang, Y. He and Y. Hu, "Experimental investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluids," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 86, pp. 363–368, July 2015.

10. M. Riahi *et al.*, "Optimization of Efficiency in Indirect Water Bath Heaters of Ardabil City Gate Stations," in *Proc. 7th Mediterranean Combustion Symposium (MCS-7)*, Chia Laguna, Cagliari, Sardinia, Italy, Sep. 11–15, 2011. [Онлайн]. Доступно: <https://www.combustion-institute.it/proceedings/MCS-7/papers/PEC/PEC-12.pdf> (Дата звернення: 15.04.2025).

11. H. Kargarsharifabad, M. B. Shafii and N. Rahbar, "Experimental investigation of the increasing thermal efficiency of an indirect water bath heater by use of thermosyphon heat pipe," *Therm. Sci.*, vol. 24, no. 6B, pp. 4277–4287, 2020.

12. B. Khalili, H. Kargarsharifabad, N. Rahbar, A. A. Esfahlani and E. Jamshidi, "Performance evaluation of a CGS gas heater-powered HDH desalination system using thermosyphon heat pipes: An experimental study with economic and environmental assessment," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 152, p. 107297, Mar. 2024.

13. S. Rastegar, H. Kargarsharifabad, N. Rahbar and M. B. Shafii, "Distilled water production with combination of solar still and thermosyphon heat pipe heat exchanger coupled with indirect water bath heater – Experimental study and thermo economic analysis," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 176, p. 115456, Aug. 2020.

14. H. Jouhara, A. Chauhan, T. Nannou, S. Almahmoud, B. Delpech and L. C. Wrobel, "Heat pipe based systems - Advances and applications," *Energy*, vol. 128, pp. 729–754, June 2017.

15. F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th ed. New York, NY, USA: Wiley, 2006.

16. H. Jouhara, V. Anastasov and I. Khamis, "Potential of heat pipe technology in nuclear seawater desalination," *Desalination*, vol. 249, no. 3, pp. 1055–1061, Dec. 2009.

17. C. W. Chan, E. Siqueiros, J. Ling-Chin, M. Royapoor and A. P. Roskilly, "Heat utilisation technologies: a critical review of heat pipes," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 615–627, Oct. 2015.
18. O. Mahian, A. Kianibarbar, S. A. Kalogirou, I. Pop and S. Wongwises, "A review of the applications of nanofluids in solar energy," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 57, no. 2, pp. 582–594, Jan. 2013.
19. K. Khanafer and K. Vafai, "A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 19–20, pp. 4410–4428, Sep. 2011.
20. M. H. Kayhani, H. Soltanzadeh, M. M. Heyhat, M. Nazari and F. Kowsary, "Experimental study of convective heat transfer and pressure drop of TiO₂ / water nanofluid," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 39, no. 3, pp. 456–462, Mar. 2012.
21. M. Hemmat and S. Saedodin, "An experimental investigation and new correlation of viscosity of ZnO–EG nanofluid at various temperatures and different solid volume fractions," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 55, pp. 1–5, Oct. 2014.
22. N. Parashar, M. Seraj, S. M. Yahya and M. Anas, "Development of an artificial neural network for the prediction of relative viscosity of ethylene glycol based nanofluids," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 18, p. 6427, Sep. 2020.
23. N. Parashar, N. Aslfattahi, S. M. Yahya *et al.*, "An artificial neural network approach for the prediction of dynamic viscosity of MXene-palm oil nanofluid using experimental data," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 144, pp. 1175–1186, May 2021.
24. G. Longo, C. Zilio, E. Ceseracciu and M. Reggiani, "Application of Artificial Neural Network (ANN) for the prediction of thermal conductivity of oxide–water nanofluids," *Nano Energy*, vol. 1, no. 2, pp. 290–296, Mar. 2012.
25. M. M. Papari, F. Yousefi, J. Moghadasi, H. Karimi and A. Campo, "Modeling thermal conductivity augmentation of nanofluids using diffusion neural networks," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 50, no. 1, pp. 44–52, Jan. 2011.
26. M. Hojjat, S. Gh. Etemad, R. Bagheri and J. Thibault, "Thermal conductivity of non-Newtonian nanofluids: Experimental data and modeling using

neural network," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 54, no. 5–6, pp. 1017–1023, Feb. 2011.

27. D. Zhu, X. Li, N. Wang, X. Wang, J. Gao and H. Li, "Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--H}_2\text{O}$ nanofluids," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 9, no. 1, pp. 131–139, Jan. 2009.

28. S. M. S. Murshed, K. C. Leong and C. Yang, "Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 47, no. 5, pp. 560–568, May 2008.

29. M. H. Najafmoud, A. Alizadeh, A. Mohamadian and J. Mousavi, "Investigation of relationship between air and soil temperature at different depths and estimation of the freezing depth (case study: Khorasan Razavi)," *J. Water Soil*, vol. 22, no. 1, pp. 456–466, 2008.

30. K. Akhlaghi, H. Eftekhari, M. Farzaneh-Gord and M. Hassani, "Solar heat utilization in Birjand natural gas pressure reduction, a thermo-economic analysis," *Int. J. Chem. Environ. Eng.*, vol. 2, no. 4, pp. 267–275, Aug. 2011.

31. H. Ghaebi, B. Farhang, H. Rostamzadeh and T. Parikhani, "Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of using city gate station (CGS) heater waste for power and hydrogen production: a comparative study," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 43, no. 4, pp. 1855–1874, Jan. 2018.

32. M. Saadat-Targhi and S. Khanmohammadi, "Energy and exergy analysis and multi-criteria optimization of an integrated city gate station with organic Rankine flash cycle and thermoelectric generator," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 149, pp. 312–324, Mar. 2019.

33. C. Li, S. Zheng, J. Li and Z. Zeng, "Optimal design and thermo-economic analysis of an integrated power generation system in natural gas pressure reduction stations," *Energy Convers. Manag.*, vol. 200, p. 112079, Nov. 2019.

34. A. Ebrahimi-Moghadam, M. Deymi-Dashtebayaz, H. Jafari *et al.*, "Energetic, exergetic, environmental and economic assessment of a novel control system for indirect heaters in natural gas city gate stations," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 141, no. 6, pp. 2573–2588, Sep. 2020.

35. A. Arabkoohsar, M. Farzaneh-Gord, M. Deymi-Dashtebayaz, L. Machado and R. N. N. Koury, "A new design for natural gas pressure reduction points by employing a turbo expander and a solar heating set," *Renew. Energy*, vol. 81, pp. 239–250, Sep. 2015.

36. E. Ashouri, F. Veysi, E. Shojaeizadeh and M. Asadi, "The minimum gas temperature at the inlet of regulators in natural gas pressure reduction stations (CGS) for energy saving in water bath heaters," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 21, pp. 230–240, Nov. 2014.

37. М. І. Горбійчук, М. І. Когутяк та В. М. Гарасимів, "Математична модель підігрівника з проміжним теплоносієм," *Методи та прилади контролю якості*, № 2(47), с. 83–96, 2021.

38. М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук та М. І. Когутяк, "Синтез лінеаризованих математичних моделей нагрівника з проміжним теплоносієм," *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 3, с. 144–153, 2023.

39. M. Olfati, M. Bahiraei, S. Heidari and F. Veysi, "A comprehensive analysis of energy and exergy characteristics for a natural gas city gate station considering seasonal variations," *Energy*, vol. 155, pp. 721–733, July 2018.

40. А. Р. Степанюк, *Пічне обладнання у хімічних та нафтопереробних процесах: навч. посібник*. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.

41. С. М. Пономаренко, *Основи фізики горіння: навч. посібник*. К.: НТУУ «КПІ», 2016.

42. С. Л. Кусковець, О. С. Шаталов та В. О. Турченко, *Основи теорії горіння та вибуху: навч. посібник*. Рівне: НУВГП, 2012.

43. М. І. Горбійчук та М. З. Василенчук, "Синтез структурної схеми нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування," *ВІСНИК ХНТУ. Інженерні науки*, № 4(87), с. 44–52, 2023.

44. М. І. Horbiichuk, M. Z. Vasylenchuk and M. I. Kohutiak, "Analytical studies on dynamic properties of indirect oil heaters," *Nauk. Visn. Nats. Hirn. Univ.*, no. 6, pp. 151–157, 2024.

45. М. Горбійчук, М. Василенчук та М. Когутяк, "Дослідження динамічних властивостей непрямого нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування," *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, № 2(49), с. 29–40, 2024.

46. Я. В. Грудз, В. П. Гоцуляк та М. Я. Криль, "Температура горіння природного газу як критерій енергоефективності," *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, № 1(66), с. 7–11, 2018.

47. М. П. Ковалко, В. Я. Грудз, В. Б. Михалків та ін., *Трубопровідний транспорт газу*. К.: АренаЕКО, 2002.

48. S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Philadelphia, PA, USA: SIAM, 1994.

49. R. C. Reid, J. M. Prausnitz and T. K. Sherwood, *The Properties of Gases and Liquids*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1987.

50. G. E. Kuster, "H-infinity norm calculation via a state space formulation," M.S. thesis, Virginia Tech, Blacksburg, VA, USA, 2013. [Онлайн]. Доступно: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/49544/Kuster_GE_T_2013.pdf?isAllowed=y&sequence=1 (Дата звернення: 15.04.2025).

51. М. І. Горбійчук, *Математичне моделювання на ЕОМ технологічних об'єктів: навч. посіб.* Івано-Франківськ, 2001.

52. М. І. Горбійчук та Є. П. Пістун, *Числові методи і моделювання на ЕОМ: навчальний посібник*. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010.

53. М. Г. Попович та О. В. Ковальчук, *Теорія автоматичного керування*. К.: Либідь, 2007.

54. М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук та М. І. Когутяк, "Система автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику," *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 4, с. 314–331, 2024.

55. М. І. Horbiychuk, N. T. Lazoriv, M. I. Kohutyk and I. Z. Manuliak, "Experimental research on muffle furnace dynamic properties," *Nauk. Visn. Nats. Hirn. Univ.*, no. 3 (195), pp. 144–150, 2023.

56. М. П. Симою, "Визначення коефіцієнтів передавальних функцій лінеаризованих ланок і систем авторегулювання," *Автоматика і телемеханіка*, т. 18, № 6, с. 514–528, 1957.

57. M. Gorbiychuk, O. Zamikhovska, L. Zamikhovskiy, S. Zikratyi and L. Shtaiar, "Evaluation of dynamic properties of gas pumping units according to the results of experimental researches," *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, vol. 2, no. 2(98), pp. 73–81, 2019.

58. G. C. Newton, L. A. Gould and J. F. Kaiser, *Theory of Linear Tracking Systems*. GIF-ML, 1961.

59. M. Gorbiychuk, N. Lazoriv, L. Chyhur and I. Chyhur, "Determining configuration parameters for proportionally integrated differentiating controllers by arranging the poles of the transfer function on the complex plane," *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, vol. 5, no. 2(113), pp. 80–93, 2021.

60. М. І. Горбійчук, *Математичні методи оптимізації: навч. посіб.* Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2018.

61. Y. Li, Z. Zhang, X. Hao and W. Yin, "A Measurement System for Time Constant of Thermocouple Sensor Based on High Temperature Furnace," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 12, p. 2585, Dec. 2018.

62. G. C. Newton, L. A. Gould and J. F. Kaiser, *Analytical Design of Linear Feedback Controls*. New York, NY, USA: Wiley, 1957.

63. M. Horbiichuk, M. Vasylenchuk, I. Yednak та A. Lahoida, "Devising a combined method for setting pi/pid controller parameters for oil and gas facilities," *East.-Eur. J. Enterp. Technol.*, т. 1, № 2(133), с. 85–95, 2025.

64. В. І. Корнієнко, О. Ю. Гусєв, О. В. Герасіна та В. П. Щокін, *Теорія систем керування: підручник*. Дніпро: НГУ, 2017.

65. М. І. Горбійчук та М. З. Василенчук, "Структурно-параметричний синтез системи автоматичного керування шляховим нагрівником нафти," *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, № 355(4), с. 112–119, 2025.

66. М. І. Горбійчук та Д. Д. Поварчук, "Метод налаштування параметрів ПІ- і ПД-регуляторів системи автоматичного керування процесом двоступеневої сепарації нафти," *Науковий вісник ІФНТУНГ*, № 2(43), с. 89–95, 2017.

67. М. І. Горбійчук, Я. І. Заячук та М. І. Когутяк, "Практичні аспекти реалізації коректорів автоматичних систем керування," *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 1, с. 101–110, 2024.

68. М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук та М. І. Когутяк, "Інваріантна система автоматичного керування шляховим нагрівачем нафти," *ВІСНИК ХНТУ. Інженерні науки*, т. 1, № 3(94), с. 57–69, 2025.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Обчислення параметрів математичної моделі нафтових підігрівачів

```

% =====
% Обчислення параметрів математичної
% моделі нафтових підігрівачів
% =====
% Рівняння № 1 (для нафти)
% Обчислення постійної часу tau_n
% Вихідні дані
%Mn -маса продукту у змішувачу, кг
%Cn -середня теплоємність, кДж/(кг*град. К)
%Csz_n -коефіцієнт теплопередачі від стінки до
% продукту, що нагрівається, ккал/((кв.м*год*град. К)
% Fz -площа поверхні обміну змішувача
fprintf('РІВНЯННЯ №1\n')
Mn=5.35e3;
Cn=2038;
Csz_n=562;
Fz=254;
tau_n=Mn*Cn/(Csz_n*Fz);
fprintf('Постійна часу tau_n, с\n')
fprintf('tau_n=%7.4f\n', tau_n)
% -----
% Обчислення коефіцієнта Kn1
Kn1=Cn/(Csz_n*Fz);
fprintf('Коефіцієнт Kn1, с/кг\n')
fprintf('Kn1=%7.4f\n', Kn1)
% =====
% Рівняння № 2 (стінка-нафта)
%Mzn -маса змішувача, кг
%cz -теплоємність стінки, Дж/(кг *К)
%cw_sz -коефіцієнт теплопередачі від води до стінки, Вт/(м:2*К)
fprintf('\n')
fprintf('РІВНЯННЯ №2\n')
Mzn=7.996e3;
cz=460;
cw_sz=175;
tau_sz=Mzn*cz/((cw_sz+Csz_n)*Fz);
Kw=cw_sz/(cw_sz+Csz_n);
Kn=Csz_n/(cw_sz+Csz_n);

```

Продовження додатку А

```

fprintf('Постійна часу tau_sz, c\n')
fprintf('tau_sz=%7.4f\n',tau_sz)
fprintf('Коефіцієнт Kwcp\n')
fprintf('Kw=%7.4f\n',Kw)
fprintf('Коефіцієнт Kncp\n')
fprintf('Kn=%7.4f\n',Kn)
% =====
% Рівняння № 3 (вода)
% Mw -маса води, кг
% cw -теплоємність води
% Csdk -коефіцієнт теплопередачі від стінки
% димового каналу до води, Вт/(м^2*К)
% Fdk -площа поверхні димового каналу
Mw=3.35e3;
cw=3841;
Fdk=28.5;
Csdk=473;
tau_w=Mw*cw/(Csdk*Fdk+cw_sz*Fz);
Ksdk=Csdk*Fdk/(Csdk*Fdk+cw_sz*Fz);
Ksz=cw_sz*Fz/(Csdk*Fdk+cw_sz*Fz);
fprintf('\n')
fprintf('РІВНЯННЯ №3\n')
fprintf('Постійна часу tau_w, c\n')
fprintf('tau_w=%7.4f\n',tau_w)
fprintf('Коефіцієнт Ksdk\n')
fprintf('Ksdk=%7.4f\n',Ksdk)
fprintf('Коефіцієнт Ksz\n')
fprintf('Ksz=%7.4f\n',Ksz)
% =====
% Рівняння № 4 (димові гази)
% Vzdg-об'єм димового каналу підігрівника, куб.м
% ro_cpdg-середня густина димових газів кг/куб.м
% Cdg_in, Cdg-теплоємність продуктів згорання
% на виході печі і топки, кДж/(кг*К)
% alpha-коефіцієнт надлишку повітря
% Mdg-маса продуктів згорання на 1 кг паливного газу
% Bm-масова витрата палива кг/год
% Eps_c -ступінь чорноти поверхні стінки газоходу
% C0 -коефіцієнт випромінювання абсолютно
% чорного тіла, кг/(м^2*К^4)
% Eps_dk-ступінь чорноти димових газів при середній
% температурі газу
% Adk-поглинаюча спроможність газу при температурі

```

Продовження додатку А

```

% поверхні стінки димового каналу
% Eta_T-коефіцієнт корисної дії нагрівника
% q_dH-теплотворна здатність паливного газу, Дж/кг
Vzdg=3.013;
ro_cpdg=0.275;
Cdg_in=1.321;
Cdg=1.112;
alpha=1.1;
Mdg=19.05;
Bm=58;
Eps_c=0.85;
C0=5.63;
Eps_dk=0.171;
Adk=0.37;
Eta_T=0.72;
q_dH=4.956e7;
Ccpdg=0.5*(Cdg_in+Cdg)*1e3;
L1=Vzdg*ro_cpdg*Ccpdg;
L0=(Mdg-1)/alpha;
k1=Cdg*Bm*(1+alpha*L0)*1000/3600;
k2=(Eps_c+1)*C0*Fdk*Eps_dk*0.5e-8;
k3=(Eps_c+1)*C0*Fdk*Adk*0.5e-8;
k4=2.1*Fdk;
k5=Bm*Eta_T*q_dH/3600;
fprintf('\n')
fprintf('РІВНЯННЯ №4\n')
fprintf('Коефіцієнт k1\n')
fprintf('k1=%7.4f\n',k1)
fprintf('Коефіцієнт k2\n')
fprintf('k2=%7.4e\n',k2)
fprintf('Коефіцієнт k3\n')
fprintf('k3=%7.4e\n',k3)
fprintf('Коефіцієнт k4\n')
fprintf('k4=%7.4f\n',k4)
fprintf('Коефіцієнт k5\n')
fprintf('k5=%7.4e\n',k5)
% =====
% ЛІНЕАРИЗАЦІЯ МОДЕЛЕЙ
% =====
% Модель № 1
% T0n_in-температура нафти на вході ПН, К
% T0n_out-температура нафти на виході ПН, К
% G0n-масова витрата нафти, кг/с

```

Продовження додатку А

```

T0n_in=315.5;
T0n_out=45+273;
G0n=24.2;
syms Tn_in Tn_out Gn
F0=2*Kn1*Gn*(Tn_in-Tn_out);
f11=diff(F0,1,Gn);
f12=diff(F0,1,Tn_in);
f13=diff(F0,1,Tn_out);
A11=subs(f11,[Gn Tn_in Tn_out],[G0n T0n_in T0n_out]);
A12=subs(f12,[Gn Tn_in Tn_out],[G0n T0n_in T0n_out]);
A13=subs(f13,[Gn Tn_in Tn_out],[G0n T0n_in T0n_out]);
kg=double(A11);
kt_n1=double(A12);
kt_n2=double(A13);
fprintf('\n')
fprintf('РІВНЯННЯ ДИНАМІКИ №1\n')
fprintf('kg=%7.4f\n',kg)
fprintf('kt_n1=%7.4f\n',kt_n1)
fprintf('kt_n2=%7.4f\n',kt_n2)
% =====
% Модель № 4
% Beta_U=a0+a1*U
% T0dg -температура димових газів на виході, К
% T0sdk -температура стінки димового каналу, К
% Tmax -температура газу при горінні
% U0-командний сигнал
a0=0.0113;
a1=0.00806;
T0dg=505.5;
T0sdk=183+273;
Tmax=2.281e3;
U0=0.6;
syms Tdg Tsdk U
Beta_U=a0+a1*U;
F1=((k5-k1*Tdг)*Beta_U-k2*(0.5*(Tmax+Tdг))^4+...
    k3*Tsdk^4-k4*(0.5*(Tmax+Tdг)-Tsdk)^(5/4))/(0.5*L1);
f21=diff(F1,1,Tdg);
f22=diff(F1,1,Tsdk);
f23=diff(F1,1,U);
A21=subs(f21,[Tdг Tsdk U],[T0dg T0sdk U0]);
A22=subs(f22,[Tdг Tsdk U],[T0dg T0sdk U0]);
A23=subs(f23,[Tdг Tsdk U],[T0dg T0sdk U0]);
kT1=double(A21);

```

Продовження додатку А

```

kT2=double(A22);
kU=double(A23);
tau_T=-1/kT1;
K_T1=-kT2/kT1;
K_U=-kU/kT1;
fprintf('\n')
fprintf('РІВНЯННЯ ДИНАМІКИ №4\n')
fprintf('kT1=%7.4f\n',kT1)
fprintf('kT2=%7.4f\n',kT2)
fprintf('kU=%7.4f\n',kU)
fprintf('Постійна часу, c\n')
fprintf('tau_T=%7.4f\n',tau_T)
fprintf('Коефіцієнти\n')
fprintf('K_T1=%7.4f\n',K_T1)
fprintf('K_U=%7.4f\n',K_U)
save('TempMod_NL','Kn1','Kn','Kw','Ksdk','Ksz','tau_sz',...
    'tau_n','tau_w','k1','k2','k3','k4','k5')
% =====
% Модель № 5
% Psi-коефіцієнт розподілу тепла в топці
% Mdk-маса димового каналу
% Cdk-теплоємність стінки
% Eps_dg-черноти димових газів при середній температурі
% Adg-поглинаюча здатність газу
% T0w-температура води в робочій точці
% T0dgsр-середня температура димових газів
syms Tw Tdgsр
Psi=1.2;
Mdk=2.239e3;
Cdk=460;
Eps_dg=460;
Adg=0.37;
T0w=355.5;
T0dg=505.5;
F2=(0.5*Psi*(Eps_c+1)*C0*Fdk*(Eps_dk*((Tmax+Tdg)/200)^4-...
    Adg*(Tsdk/100)^4)+2.1*Fdk*(0.5*(Tmax+Tdg)-
    Tsdk)^(1/4)*(0.5*(Tmax+Tdg)-Tsdk)-...
    Csdk*Fdk*(Tsdk-Tw))/(Mdk*Cdk);
f31=diff(F2,1,Tdg);
f32=diff(F2,1,Tsdk);
f33=diff(F2,1,Tw);
A31=subs(f31,[Tdg Tsdk U],[T0dg T0sdk T0w]);
A32=subs(f32,[Tdg Tsdk U],[T0dg T0sdk T0w]);

```

Кінець додатку А

```

A33=subs(f33,[Tdg Tsdk U],[T0dg T0sdk T0w]);
kt_1=double(A31);
kt_2=double(A32);
kt_3=double(A33);
tau_1=-1/kt_2;
Kt1=-kt_1/kt_2;
Kt2=-kt_3/kt_2;
fprintf('\n')
fprintf('РІВНЯННЯ ДИНАМІКИ №5\n')
fprintf('kt_1=%7.4f\n',kt_1)
fprintf('kt_2=%7.4f\n',kt_2)
fprintf('kt_3=%7.4f\n',kt_3)
fprintf('Постійна часу, c\n')
fprintf('tau_1=%7.4f\n',tau_1)
fprintf('Коефіцієнти\n')
fprintf('Kt1=%7.4f\n',Kt1)
fprintf('Kt2=%7.4f\n',Kt2)
save('TempModel','tau_n','kt_n1','kg','tau_sz','Kw','Kn',...
    'tau_w','Ksdk','Ksz','tau_T','K_T1','K_U','tau_1','Kt1','Kt2')

```

ДОДАТОК Б

Обчислення передавальних функцій шляхового нагрівника нафти

```

% =====
% ПЕРЕДАВАЛЬНІ ФУНКЦІЇ
% ШЛЯХОВОГО НАГРІВНИКА НАФТИ
% (два виходи)
% =====
load TempModel
% -----
%Формування масиву значень абсцис (час)
az=6;
N=1000;
% Кінцевий час для побудови графіків
t1=5000;%температура входу-виходу
t2=1000;%витрата продукту на вході-температура на виході
t3=3000;%ступінь відкриття РО-температура на виході
t4=5000;%температура продукту на вході-температура димових газів
t5=5000;%витрата продукту на вході-температура димових газів
t6=5;%ступінь відкриття РО-температура димових газів
tend=[t1 t2 t3 t4 t5 t6];
    for i=1:az
        hz=tend(i)/N;
        t(i,:)=0:hz:tend(i);
    end
% -----
syms s
al12=-Kw;
al13=tau_sz*s+1;
al21=-Ksdk;
al22=tau_w*s+1;
al23=-Ksz;
al31=tau_1*s+1;
al32=-Kt2;
A=[0 al12 al13;al21 al22 al23;al31 al32 0];
D=det(A);
A11=tau_n*s+1+kt_n1-Kn*(al21*al32-al22*al31)/D;
A12=2*al12*al21*Kt1/D;
A21=Kn*K_T1*al23*al32/(2*D);
A22=tau_T*s+1-K_T1*Kt1*(al12*al23-al13*al22)/D;
Ds=A11*A22-A12*A21;
W11=(A22*((kt_n1-1-tau_n*s)*D+Kn*(al21*al32-...
    al22*al31))+0.5*A12*Kn*K_T1*al23*al32)/(D*Ds);

```

Кінець додатку Б

```

tz=t(1,:);
Ws11=fun_ws(W11,tz);
figure
W12=kg*A22/Ds;
tz=t(2,:);
Ws12=fun_ws(W12,tz);
figure
W13=-K_U*A12/Ds;
tz=t(3,:);
Ws13=fun_ws(W13,tz);
figure
W21=-(0.5*A11*Kn*Kt1*al23*al32+A21*((kt_n1-1-tau_n*s)*D+...
    Kn*(al21*al32-al22*al31)))/(D*Ds);
tz=t(4,:);
Ws21=fun_ws(W21,tz);
figure
W22=-kg*A21/Ds;
tz=t(5,:);
Ws22=fun_ws(W22,tz);
figure
W23=A11*K_U/Ds;
tz=t(6,:);
Ws23=fun_ws(W23,tz);

```

Підпрограма fun_ws

```

function Ws=fun_ws(W,t)
[N1,D1]=numden(W);
Num=collect(N1);
Den=collect(D1);
num_W=sym2poly(Num);
den_W=sym2poly(Den);
Ws=tf(num_W/den_W(end),den_W/den_W(end));
h=step(Ws,t);
plot(t,h)
xlabel('Час, t, c')
ylabel('Температура, grad. C')
grid on

```

ДОДАТОК В

Обчислення передавальних функцій нагрівача

```

% =====
% ПЕРЕДАВАЛЬНІ ФУНКЦІЇ НАГРІВАЧА
% =====
load TempModel
% -----
% Модель -1 (нафта)
% tau_n-постійна часу
% kt_n1, kg-коефіцієнти
% -----
% Модель -2 (стінка-вода)
% tau_sz-постійна часу
% Kw,Kn-коефіцієнти
% -----
% Модель -3 (вода)
% tau_w-постійна часу
%Ksdk,Ksz -коефіцієнти
% -----
% Модель -4 (димові гази)
% tau_T-постійна часу
%K_T1,K_U-коефіцієнти
% -----
% Модель -5
% tau_1-постійна часу
% Kt1,Kt2-коефіцієнти
% -----
syms s
% -----
% Обчислення a11(s)
psz=[tau_sz 1];
% pktn=[tau_n 1-2*kt_n1];
pktn=[tau_n 1+kt_n1];
Psz=poly2sym(psz,s);
Pktn=poly2sym(pktn,s);
r1=expand(Pktn-0.5*Kn/Psz);
a11=collect(r1,s);%
% -----
% Обчислення a12(s)
r2=expand(-Kw/Psz);
a12=collect(r2,s);
% -----

```

Продовження додатку В

```

% Обчислення a13(s)
% a13(s)=0
% -----
% Обчислення a21(s)
r3=expand(-0.5*Kn*Ksz/Psz);
a21=collect(r3,s);
% -----
% Обчислення a22(s)
pw=[ tau_w 1];
psz=[tau_sz 1];
pt1=[tau_1 1];
Pw=poly2sym(pw,s);
Psz=poly2sym(psz,s);
Pt1=poly2sym(pt1,s);
r4=expand(Pw-Ksz*Kw/Psz-Ksdk*Kt2/Pt1);
a22=collect(r4,s);
% -----
% Обчислення a23(s)
r5=expand(-Ksdk*Kt1/Pt1);
a23=collect(r5,s);
% -----
% Обчислення a31(s)
% a31=0
% -----
% Обчислення a32(s)
r6=expand(-K_T1*Kt2/Pt1);
a32=collect(r6,s);
% -----
% Обчислення a33(s)
pte=[tau_T 1];
Pte=poly2sym(pte,s);
r7=expand(Pte-K_T1*Kt1/Pt1);
a33=collect(r7,s);
% =====
% Обчислення b11(s)
pn=[tau_n 1];
Pn=poly2sym(pn,s);
% v1=expand(Kn/Psz-(Pn+2*kt_n1));
% v1=expand(Kn/Psz+2*kt_n1-Pn);
v1=expand(Kn-Pn+0.5/Psz);
b11=collect(v1,s);
% -----
% Обчислення b12(s)

```

Продовження додатку В

```

b12=2*kg;
% -----
% Обчислення b13(s)
% b13=0
% -----
% Обчислення b21(s)
v2=expand(0.5*Ksz*Kn/Psz);
b21=collect(v2,s);
% -----
% b22=0;b23=0;b31=0;b32=0
% -----
b33=K_U;
% =====
A=[a11 a12 0;a21 a22 a23;0 a32 a33];
B=[b11 b12 0;b21 0 0;0 0 b33];
V=A^-1*B;
% -----
% Передавальна функція W11
v11=V(1,1);
Rv11=collect(v11,s);
ws11=expand(Rv11);
Wq11=fun_W(ws11);
% -----
% Передавальна функція W12
v12=V(1,2);
Rv12=collect(v12,s);
ws12=expand(Rv12);
Wq12=fun_W(ws12);
% -----
% Передавальна функція W13
v13=V(1,3);
Rv13=collect(v13,s);
ws13=expand(Rv13);
Wq13=fun_W(ws13);
% -----
% Передавальна функція W21
v21=V(2,1);
Rv21=collect(v21,s);
ws21=expand(Rv21);
Wq21=fun_W(ws21);
% -----
% Передавальна функція W22
v22=V(2,2);

```

Кінець додатку В

```

Rv22=collect(v22,s);
ws22=expand(Rv22);
Wq22=fun_W(ws22);
% -----
% Передавальна функція W23
v23=V(2,3);
Rv23=collect(v23,s);
ws23=expand(Rv23);
Wq23=fun_W(ws23);
% -----
% Передавальна функція W31
v31=V(3,1);
Rv31=collect(v31,s);
ws31=expand(Rv31);
Wq31=fun_W(ws31);
% -----
% Передавальна функція W32
v32=V(3,2);
Rv32=collect(v32,s);
ws32=expand(Rv32);
Wq32=fun_W(ws32);
% Передавальна функція W33
v33=V(3,3);
Rv33=collect(v33,s);
ws33=expand(Rv33);
Wq33=fun_W(ws33);
save('TransferFunction_q','Wq11','Wq12','Wq13','Wq21',...
     'Wq22','Wq23','Wq31','Wq32','Wq33')

```

Підпрограма fun_W

```

function W=fun_W(w)
[r,q]=numden(w);
R=sym2poly(r);
Q=sym2poly(q);
r=max(R);
q=max(Q);
rs=round(r);
qs=round(q);
v=min(rs,qs);
W=tf(R/v,Q/v);

```

Спрощення передавальних функцій нагрівника нафти методом Генкеля

```

% =====
% СПРОЩЕННЯ ПЕРЕДАВАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ НАГРІВНИКА
% (метод Генкеля)
% =====
% Ввід даних
% dl-вибір порядку передавальної функції
% W21-ПФ температура на вході-т-ра димових газів
% W22-ПФ зміна витрати на вході-т-ра димових газів
% W23-ПФ витрата паливного газу газу-т-ра димових газів
load TransFunction_new
fprintf('Вибір передавальної функції\n')
fprintf('При kx=1 ПФ-W21;при kx=2 ПФ W22;при kx=3 ПФ W23\n')
kx=input('Ввести kx=');
fprintf('Вибір порядку передавальної функції\n')
% -----
switch kx
    case 1
        W3=W21;
        G=W3;
        tq=5000;
    case 2
        W3=W22;
        G=W3;
        tq=5000;
    case 3
        W3=W23;
        G=W3;
        tq=3;
end
hsv_add=hankelsv(G);
bar(hsv_add)
title( 'Сингулярні значення моделі Ганкеля (G))' );
xlabel( 'Номери станів' )
ylabel( 'Сингулярні значення (\sigma_i)' )
line([10.5 10.5],[0 1.5e-3], 'Color' , 'r' , ...
    'linestyle' , '--' , 'linewidth' , 3)
dl=input('Ввести dl=');
[Gr_add,info_add]=reduce(G,dl);
[A,B,C,D]=ssdata(Gr_add);
% -----

```

Продовження додатку Г

```
% Перехід у простір станів
```

```
syms s
nq=length(A(1,:));
I=eye(nq);
Wq=C*(I*s-A)^-1*B+D;
[num,den]=numden(Wq);
Nu=sym2poly(num);
De=sym2poly(den);
kq=Nu(end)/De(end);
Nu1=Nu/Nu(end);
De1=De/De(end);
Wq1=kq*tf(Nu1,De1);
```

```
% -----
```

```
% Похибки апроксимації
```

```
N=5000;
% tq=5e4;
hq=tq/N;
t=0:hq:tq;
Hq1=step(G,t);
Hq2=step(Wq1,t);
figure
plot(t,Hq1,t,Hq2)
grid on
del=max(abs(Hq1-Hq2)*100/max(abs(Hq1)));
fprintf('Похибки апроксимації, відсотки\n')
fprintf('delta=%7.4e\n',del)
switch kx
case 1
    WR21=Wq1;
    figure
    wq = logspace(-5,-2,100);
    bode(G,wq)
    hold on
    bode(Gr_add,wq)
    grid on
    title('Порівняння оригінальної (G) з редукованою моделлями (Gr
add)')
    save('wr21_2out','WR21');
case 2
    WR22=Wq1;
    figure
    wq = logspace(-5,-2,100);
    bode(G,wq)
```

Кінець додатку Г

```
hold on
bode(Gr_add,wq)
grid on
title( 'Порівняння оригінальної (G) з редукованою моделлями (Gr
add)' )
save('wr22_2out','WR22');
case 3
figure
WR23=Wq1;
bode(G, 'b' ,Gr_add, 'r' )
grid on
title( 'Порівняння оригінальної (G) з редукованою моделлями (Gr
add)' )
legend( 'G - оригінальна' , 'Gr add - редукована')
save('wr23_2out','WR23');
end
```

Обчислення параметрів функції передачі методом площ

```

%=====
%Обчислення параметрів функції
%передачі методом площ
%=====
%Вхідні дані
%Масив експериментальних даних,
%які формуються окремим файлом
% Тур-ординати "кривої розгону"
% tt-час
%m-ступінь полінома чисельника ПФ
%NN-ступінь полінома знаменника
%(m не більше NN)
% "Експериментальні" дані записані
% у файлі AsCurve
% tz-час, Нt-ординати кривої розгону
%-----
load TransFunction_new
te=5000;
Ne=5000;
he=te/Ne;
t=0:he:te;
h1=step(W13,t);
fprintf('Ітераційний процес вибору степенів\n')
fprintf('поліномів чисельника і знаменника ПФ\n')
fprintf('\n')
fprintf('Введіть значення m степені полінома чисельника ПФ\n')
m=input('m=');
fprintf('Введіть значення NN степені полінома знаменника ПФ\n')
NN=input('NN=');
    Typ=h1;
    n=length(Typ);
plot(t,Typ)
grid on
x_y=Typ(end);
y=Typ/x_y;
fi=1-y;
figure
plot(t,fi)
N=m+NN;
for k=1:N
y1=((-t').^(k-1)).*fi;

```

Продовження додатку Д

```

%Обчислення площ і моментів
%допоміжної функції
Sa=fun_Area(t,y1);
    Mu(k)=Sa/factorial(k-1);
    if k==1
        S(1)=Mu(1);
    else
        Sr=0;
        for i=1:k-1
            Sr=Sr+Mu(i)*S(k-i);
        end
        S(k)=Mu(k)+Sr;
    end
end
%Обчислення параметрів ФП
A=fun_CompMatrix(m,NN,S);
Ab=A^-1*S';
fprintf(' ПЕРЕДАВАЛЬНА ФУНКЦІЯ\n')
fprintf('\n')
An=Ab;
Ad=Ab;
An(NN+1:end)=[];
An=An(NN:-1:1);
Ad(1:NN)=[];
Ad=Ad(m:-1:1);
fprintf('Чисельник передавальної функції\n')
for i=1:m
    fprintf('b%d=%7.4f ',i-1,Ad(i))
end
fprintf('b%d=%d\n',m,1)
fprintf('Коефіцієнт передачі\n')
fprintf('k=%7.4f\n',Typ(end))
kf=Typ(end);
fprintf('\n')
fprintf('Знаменник передавальної функції\n')
for i=1:NN
    fprintf('a%d=%7.4f ',i-1,An(i))
end
fprintf('a%d=%d\n',NN,1)
w=kf*tf([Ad' 1],[An' 1]);
%-----
Y=step(w,t);
plot(t,h1,t,Y,'red')

```

Продовження додатку Д

```

xlabel('Час, t, c')
ylabel('Температура, град. C')
grid on
%Візуалізація результатів роботи програми
figure
wq = logspace(-5,-2,100);
bode(W13,wq)
hold on
bode(w,wq)
grid on
fprintf('Похибка апроксимації\n')
Er=sum((h1-Y).^2)/Ne;
fprintf('Er=%7.4e\n',Er)

```

Підпрограма fun_Area

```

function S=fun_Area(t,y)
%Обчислення площі обмеженою кривою
%f(t)=(-t)^(k-1)*fi
N=length(y);
j=1;
S=0;
for i=1:N
    if i==1
        S1=fun_T(i,y,t);
        S=S+S1;
    else
        if i+j+1>=N
            break
        end
        k=i+j;
        S1=fun_T(k,y,t);
        S=S+S1;
        j=j+1;
    end
end

```

Підпрограма fun_CompMatrix

```

function A=fun_CompMatrix(m,n,S)
%Формування матриці A
%Вхід:
% m-порядок полінома чисельника
% n-порядок полінома знаменника
%Вихід:

```

Кінець додатку Д

```
% матриця A розміром (m+n)x(m+n)
Ae=eye(n);
A0=zeros(m,n);
Aa=[Ae;A0];
B=zeros(m+n,m);
for j=1:m
    B(j,j)=-1;
end
k=0;
for i=1:m
    for j=2+k:m+n
        B(j,i)=-S(j-k-1);
    end
    k=k+1;
end
A=[Aa B];
```

Обчислення узагальненого квадратичного критерію для ПІ-регулятора

```

% =====
% Узагальнений квадратичний критерій (ПІ-регулятор):
% Метод розміщення полюсів на комплексній
% площині (одноконтурна система)
% =====
% Побудова залежності J(alpha)
% =====
load wa13_2out
tau=200;
mu=0.95;
g=5;
N=200;
X0=1.e-4;
Xe=3.e-3;
[Nu13,De13]=tfdata(Wa13,'v');
Num13=fun_num(Nu13);
ka=Num13;
ks1=10/150;
ks_ED=0.016;
ks=ka*ks1*ks_ED;
a0=De13(1);a1=De13(2);a2=De13(3);
k=ks/a0;
a11=a1/a0;
h=(Xe-X0)/N;
x=X0:h:Xe;
C0=(x.^2*(1+mu^2)-2*(2*x.^2-x*a11)-a2/a0)/ks;
C1=-x.^2*(1+mu^2).*(2*x-a11)/ks;
b1=-ks*C0;
b2=-ks*C1;
pi0=a0;
pi1=a1;
pi2=a2+ks*C0;
pi3=ks*C1;
mu0=a0;
mu1=a1;
mu2=a2;
JN1=mu0^2*pi1*pi3+(mu1^2-2*mu2*mu0)*pi3*pi0+mu2^2*pi1*pi0;
JN2=b1.^2.*pi3+b2.^2*pi1;
JD=2*pi3.*(pi1*pi2-pi0*pi3);

```

Продовження додатку Ж

```

J=(JN1/pi0+tau^2*JN2)./JD;
plot(x,J)
grid on
% =====
% Обчислення параметрів налаштування ПІ-регулятора
% =====
x1=input('x1=');
x2=input('x2=');
options=optimset('tolX',1.e-10);
xz=fminbnd(@fun_SCS_OptAlpha_PI_2out,x1,x2,options,tau);
C0=(xz^2*(1+mu^2)-2*(2*xz^2-xz*a1)-a2/a0)/k;
C1=-xz^2*(1+mu^2).*(2*xz-a1)/k;
fprintf('ПАРАМЕТРИ НАЛАШТУВАННЯ ПІ-РЕГУЛЯТОРА\n')
fprintf('C0=%7.4e\n',C0)
fprintf('C1=%7.4e\n',C1)
fprintf('ОПТИМАЛЬНЕ ЗНАЧЕННЯ ALPHA\n')
fprintf('alpha=%7.4e\n',xz)
% =====
% Побудова перехідного процесу
% =====
num=k*[C0 C1];
den=[1 a1/a0 (a2+ks*C0)/a0 ks*C1/a0];
W=tf(num,den);
N1=1000;
t0=0;tk=5000;
h1=tk/N1;
t=t0:h1:tk;
y=g*step(W,t);
figure
plot(t,y)
grid on
% =====
% ОБЧИСЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ:
% sigma-перерегулювання
% tc-час регулювання
% =====
gamma=0.05*g;
n=length(y);
yc1=y(end)+gamma;
yc2=y(end)-gamma;
sigma=(max(y)-y(end))/y(end);
for i=n:-1:1
    if or(y(i)>=yc1,y(i)<=yc2)

```

Кінець додатку Ж

```

        break
    end
end
tc=t(i);
fprintf('\n')
fprintf('ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ\n')
fprintf('Перерегулювання\r')
fprintf('sigma=%7.4f%%\n',sigma*100);
fprintf('Час регулювання\n')
fprintf('tc=%7.4f c\n',tc);

```

Файл-функція fun_SCS_OptAlpha_PI_2out

```

function J=fun_SCS_OptAlpha_PI_2out(x,tau)
load wa13_2out
[Nu13,De13]=tfddata(Wa13,'v');
Num13=fun_num(Nu13);
ka=Num13;
ks1=10/150;
ks_ED=0.016;
ks=ka*ks1*ks_ED;
a0=De13(1);a1=De13(2);a2=De13(3);
k=ks/a0;
C0=(x.^2*(1+mu^2)-2*(2*x.^2-x*a1)-a2/a0)/k;
C1=-x.^2*(1+mu^2).*(2*x-a1)/k;
b1=-ks*C0;
b2=-ks*C1;
pi0=a0;
pi1=a1;
pi2=a2+ks*C0;
pi3=ks*C1;
mu0=a0;
mu1=a1;
mu2=a2;
JN1=mu0^2*pi1*pi3+(mu1^2-2*mu2*mu0)*pi3*pi0+mu2^2*pi1*pi0;
JN2=b1.^2.*pi3+b2.^2*pi1;
JD=2*pi3.*(pi1*pi2-pi0*pi3);
J=(JN1/pi0+tau^2*JN2)./JD;

```

Розрахунок параметрів ПІ-регулятора

```
% =====
% Розрахунок параметрів ПІ-регулятора
% (узагальнений квадратичний критерій)
% =====
% Вхідні дані
% Параметри ПФ W13:
% файл wa13_2out
% x0-вектор початкові значень C0, C1 в
% оптимізаційному процесі
% tk-кінцевий час для перехідної характеристики
% N-кількість ординат графіка
% tau-постійна величина в узагальненому
% квадратичному квадратичному критерії
%g -завдання регулятора
% -----
% Оптимізаційний процес пошуку значень C0, C1
% -----
load wa13_2out
x0=[5 5];
g=5;
tau=20;
ro=1:-0.02:0.001;
nx=length(ro);
options=optimset('MaxFunEvals',1.e10);
for j=1:nx
[x,fval1]=fmincon(@fun_SCS_Opt_PI_2out,x0,[],[],[],[],[0
0],[],[],options,tau,ro(j));
x0=x;
end
fprintf('ПАРАМЕТРИ НАЛАШТУВАННЯ ПІ-РЕГУЛЯТОРА\n')
fprintf('C0=%7.4e\n',x(1))
fprintf('C1=%7.4e\n',x(2))
% -----
% Побудова перехідного процесу
% -----
tk=2000;
N=10000;
h=tk/N;
t=0:h:tk;
[Num,Den]=fun_SCS_Wir_2out(x,Wa13);
WR=tf(Num,Den);
```

Продовження додатку 3

```

y=g*step(WR,t);
plot(t,y)
grid on
% =====
% ОБЧИСЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ:
% sigma-перерегулювання
% tc-час регулювання
% =====
gamma=0.05*g;
n=length(y);
yc1=y(end)+gamma;
yc2=y(end)-gamma;
sigma=(max(y)-y(end))/y(end);
for i=n:-1:1
    if or(y(i)>=yc1,y(i)<=yc2)
        break
    end
end
tc=t(i);
fprintf('\n')
fprintf('ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ\n')
fprintf('Перерегулювання\r')
fprintf('sigma=%7.4f%%\n',sigma*100);
fprintf('Час регулювання\n')
fprintf('tc=%7.4f c\n',tc);

Файл-функція fun_SCS_Opt_PI_2out
function J=fun_SCS_Opt_PI_2out(x,tau,ro)
load wa13_2out
[Nu13,De13]=tfdata(Wa13,'v');
Num13=fun_num(Nu13);
ka=Num13;
ks1=10/150;
ks_ED=0.016;
ks=ka*ks1*ks_ED;
a0=De13(1);a1=De13(2);a2=De13(3);
b1=-ks*x(1);
b2=-ks*x(2);
pi0=a0;pi1=a1;pi2=a2+ks*x(1);
pi3=ks*x(2);mu0=a0;
mu1=a1;mu2=a2;
JN1=mu0^2*pi1*pi3+(mu1^2-2*mu2*mu0)*pi3*pi0+mu2^2*pi1*pi0;
JN2=b1^2*pi3+b2^2*pi1;

```

Кінець додатку 3
$$JD = 2 \cdot \pi^3 \cdot (\pi_1 \cdot \pi_2 - \pi_0 \cdot \pi_3);$$
$$J = (JN_1 / \pi_0 + \tau^2 \cdot JN_2) / JD + r_0 \cdot (\log(x(1)) + \log(x(2)));$$

ДОДАТОК К

Синтез каскадно-зв'язаної системи нагрівача

```

% =====
% Узагальнений квадратичний критерій (ПІ/ПІ-регулятор):
% (каскадно-зв'язана система)
% =====
% Визначення інтервалу локального мінімуму функції
% J(alpha)
% =====
load Aprox_W13
mu=0.9;
k1=1.2;
tau=20;
k=1;
ksr=10/900;
kr=2.044;
k_ED=0.016;
ks1=ksr*k_ED;
Tsr=33.8;
[nm,dn]=tfdata(w,'v');
ka=nm(end);
ksa=ksr*kr;
ks1=10/150;
% ks1=1;
kr_ED=ksa*k_ED;
ks=ka*ks1*k_ED;
al0=Tsr;
al1=1;
a0=dn(1);
a1=dn(2);
a2=dn(3);
r=1+mu^2;
g=5;
N=2000;
X0=1e-6;
Xe=20;
h=(Xe-X0)/N;
x=X0:h:Xe;
pi0=a0*al0;
r=1+mu^2;
k1=1.5;
k=1;
kq=k1+2;

```

Продовження додатку К

```

for i=1:N
[J,C01,C02,C11]=fun_Vasel_Csd(x(i),a0,a1,a2,al0,al1,ks,kr_ED,r,k1,tau);
    pi1=a0*al1+a1*al0+a0*kr_ED*C02;
    s4=kq*x(i)-pi1/pi0;
    if and(and(C01>0,C11>0),and(C02>0,s4<0))
        if J>0
            xs(k)=x(i);
            Jc(k)=J;
            k=k+1;
        end
    end
end
if k==1
    error('Виберіть новий інтервал локального мінімуму')
end
x0=xs(1);
xk=xs(end);
N1=length(Jc);
h=(xk-x0)/N1;
clear x
x=x0:h:xk;
x(end)=[];
% =====
% Побудова залежності J(alpha)
% =====
plot(x,Jc)
grid on
x1=1;
x2=2;
% =====
% Пошук мінімуму функції J(alpha)
% =====
options=optimset('tolX',1.e-12);
[xz,Jc]=fminbnd(@fun_Vasel_Csd,x1,x2,options,a0,a1,a2,al0,al1,ks,kr_ED,r,k
1,tau);
    fprintf('ОПТИМАЛЬНЕ ЗНАЧЕННЯ ALPHA, J(alpha)\n')
    fprintf('alpha=%7.4e J(alpha)=%7.4e\n',xz,Jc)
    fprintf('\n')
% =====
% Обчислення параметрів налаштування ПІ-регулятора
% =====
[J,C01,C02,C11]=fun_Vasel_Csd(xz,a0,a1,a2,al0,al1,ks,kr_ED,r,k1,tau);

```

Продовження додатку К

```

fprintf('ПАРАМЕТРИ НАЛАШТУВАННЯ ПІ/П-РЕГУЛЯТОРІВ\n')
fprintf('C01=%7.4e\n',C01)
fprintf('C11=%7.4e\n',C11)
fprintf('C02=%7.4e\n',C02)
% =====
% Побудова перехідного процесу
% =====
b0=a0*C01;b1=a1*C01+a0*C11;b2=a1*C11;
pi1=a0*a1+a1*a0+a0*kr_ED*C02;
pi2=a1*a1+a0*(a2*+ks*C01*C02)+a1*kr_ED*C02;
pi3=C02*(a1*ks*C01+a0*ks*C11+a2*kr_ED)+a2*a1;
pi4=ks*a1*C11*C02;
Wop=ks*C02*tf([b0 b1 b2],[pi0 pi1 pi2 pi3 pi4]);
N1=500;
te=8;
h1=te/N1;
ts=0:h1:te;
Y=step(Wop,ts);
figure
plot(ts,g*Y)
grid on
% =====
% ОБЧИСЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ:
% sigma-перерегулювання
% tc-час регулювання
% =====
gamma=0.01*g;
y=g*Y;
n=length(y);
yc1=y(end)+gamma;
yc2=y(end)-gamma;
sigma=(max(y)-y(end))/y(end);
for i=n:-1:1
    if or(y(i)>=yc1,y(i)<=yc2)
        break
    end
end
tc=ts(i);
fprintf('\n')
fprintf('ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ\n')
fprintf('Перерегулювання\r')
fprintf('sigma=%7.4f%%\n',sigma*100);
fprintf('Час регулювання\n')

```

Кінець додатку К

```
fprintf('tc=%7.4f c\n',tc);
```

Файл-функція fun_Vasel_Csd

```
function J=fun_Vs_Csd(x,a0,a1,a2,al0,al1,ks,kr_ED,r,k1,k2,tau)
    a11=a0*ks;a21=a1*ks;pi0=a0*al0;
    a12=(a1-2*x*a0)*kr_ED;
    a22=kr_ED*(a2-a0*r*x.^2);
    q1=pi0*x^2*(r+k1*k2-4)+2*x*(a0*al1-a1*al0)-a1*al1-a2*al0;
    q2=pi0*x^3*(2*(k1*k2-r)-al0*r*k1*k2*x/al1)+r*x^2*(a0*al1+a1*al0)-a2*al1;
    A=[a11 a12;a21 a22];
    q=[q1;q2];
    C=A^-1*q;
    C01=C(1)/C(2);
    C11=(pi0*r*k1*k2*x^4)/(C(2)*ks*al1);
    C02=C(2);
    bt0=pi0;
    bt1=a1*al0+a0*(al1+kr_ED*C02);
    bt2=a2*al0+a1*(al1+kr_ED*C02);
    bt3=a2*(al1+kr_ED*C02);
    pi1=a0*al1+a1*al0+a0*kr_ED*C02;
    pi2=a1*al1+al0*(a2+ks*C01*C02)+a1*kr_ED*C02;
    pi3=C02*(al1*ks*C01+al0*ks*C11+a2*kr_ED)+a2*al1;
    pi4=ks*al1*C11*C02;
    mu0=bt1-pi1;mu1=bt2-pi2;mu2=bt3-pi3;mu3=-pi4;
    JN1=bt0^2*(pi*pi3*pi4-pi1*pi4^2)+(bt1^2-2*bt0*bt2)*pi0*pi3*pi4+...
        (bt2^2-2*bt1*bt3)*pi0*pi1*pi4+bt3^3*(pi0*pi1*pi2-pi0.^2*pi3);
    JN2=mu0.^2*(pi2*pi3*pi4-pi1*pi4.^2)+(mu1^2-
2*mu0*mu2)*pi0*pi3*pi4+...
        (mu2^2-2*mu1*mu3)*pi0*pi1*pi4+mu3^3*(pi0*pi1*pi2-pi0^2*pi3);
    JD=2*pi0*pi4*(pi1*pi2*pi3-pi1^2*pi4--pi0*pi3^2);
    J=(JN1+tau^2*JN2)/JD;
```

ДОДАТОК Л

Обчислення узагальненого квадратичного критерію ПІ/ПД-регулятора

```

% =====
% Узагальнений квадратичний критерій (ПІ/ПД-регулятор):
% =====
% Визначення інтервалу локального мінімуму функції
% J(alpha)
% =====
tau=25;
mu=0.2;
a0=1.4118e5;
a1=771.85;
a2=1;
ks=8.173e-1;
beta=0.352;
g=5;
N=200;
X0=0.00001;
Xe=0.2;
h=(Xe-X0)/N;
x=X0:h:Xe;
pi0=a0;
r=1+mu^2;
k1=1.5;
k=1;
for i=1:N
    C0=(pi0*(r+2*k1)*x(i)^2-a2)/ks;
    C1=pi0*r*x(i)^3/ks;
    C2=(pi0*(2+k1)*x(i)-a1)/ks;
    if and(and(C0>0,C1>0),C2>0)
        xs(k)=x(i);
        k=k+1;
    end
end
if k==1
    error('Виберіть новий інтервал локального мінімуму')
end
x0=xs(1);
xk=xs(end);
h=(xk-x0)/N;
clear x
x=x0:h:xk;
% =====

```

Продовження додатку Л

```

% Побудова залежності J(alpha)
% =====
C0=(pi0*(r+2*k1)*x.^2-a2)/ks;
C1=pi0*r*x.^3/ks;
C2=(pi0*(2+k1)*x-a1)/ks;
pi1=a1+ks*C2;
pi2=a2+ks*C0;
pi3=ks*C1;
b0=a0;
b1=a1+ks*C2;
b2=a2+beta*ks*C0/(1+beta);
p0=0;
p1=-ks*C0/(1+beta);
p2=-ks*C1;
JN1=b0^2*pi2.*pi3+(b1.^2-2*b0*b2).*pi3*pi0+b2.^2.*pi1*pi0;
JN2=p0^2*pi2.*pi3+(p1.^2-2*p0*p2).*pi3*pi0+p2.^2.*pi1*pi0;
JD=(2*pi0*pi3).*(pi1.*pi2-pi0*pi3);
J=(JN1+tau^2*JN2)./JD;
plot(x,J)
grid on
x1=input('x1=');
x2=input('x2=');
figure
options=optimset('tolX',1.e-12);
[xz,J]=fminbnd(@fun_Vaselenchuk_PI_PD,x1,x2,options,a0,a1,a2,ks,r,k1,bet
a,tau);
% =====
% Обчислення параметрів налаштування ПІ-регулятора
% =====
C0=(pi0*(r+2*k1)*xz^2-a2)/ks;
C1=pi0*r*xz^3/ks;
C2=(pi0*(2+k1)*xz-a1)/ks;
C0_1=C0/(1+beta);
C0_2 =C0*beta/(1+beta);
fprintf('ПАРАМЕТРИ НАЛАШТУВАННЯ ПІ/ПД-РЕГУЛЯТОРІВ\n')
fprintf('C0=%7.4e\n',C0)
fprintf('C1=%7.4e\n',C1)
fprintf('C2=%7.4e\n',C2)
fprintf('C01=%7.4e\n',C0_1)
fprintf('C02=%7.4e\n',C0_2)
fprintf('ОПТИМАЛЬНЕ ЗНАЧЕННЯ ALPHA, J(alpha)\n')
fprintf('alpha=%7.4e J(alpha)=%7.4e\n',xz,J)
% =====

```

Продовження додатку Л

```

% Побудова перехідного процесу
% =====
pi1=a1+ks*C2;
pi2=a2+ks*C0;
pi3=ks*C1;
den=[pi0 pi1 pi2 pi3];
num=[C0/(1+beta) C1];
W=ks*tf(num,den);
N1=100;
t0=0;tk=200;
h1=tk/N1;
t=t0:h1:tk;
y=g*step(W,t);
plot(t,y)
grid on
% =====
% ОБЧИСЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ:
% sigma-перерегулювання
% tc-час регулювання
% =====
gamma=0.01*g;
n=length(y);
yc1=y(end)+gamma;
yc2=y(end)-gamma;
sigma=(max(y)-y(end))/y(end);
for i=n:-1:1
    if or(y(i)>=yc1,y(i)<=yc2)
        break
    end
end
tc=t(i);
fprintf('\n')
fprintf('ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ\n')
fprintf('Перерегулювання\r')
fprintf('sigma=%7.4f%%\n',sigma*100);
fprintf('Час регулювання\n')
fprintf('tc=%7.4f c\n',tc);

```

Файл-функція fun_Vaselenchuk_PI_PD

```

function J=fun_Vaselenchuk_PI_PD(x,a0,a1,a2,ks,r,k1,beta,tau)
pi0=a0;
C0=(pi0*(r+2*k1)*x.^2-a2)/ks;

```

Кінець додатку Л

```

C1=pi0*r*x.^3/ks;
C2=(pi0*(2+k1)*x-a1)/ks;
pi1=a1+ks*C2;
pi2=a2+ks*C0;
pi3=ks*C1;
b0=a0;
b1=a1+ks*C2;
b2=a2+beta*ks*C0/(1+beta);
p0=0;
p1=-ks*C0/(1+beta);
p2=-ks*C1;
JN1=b0^2*pi2.*pi3+(b1.^2-2*b0*b2).*pi3*pi0+b2.^2.*pi1*pi0;
JN2=p0^2*pi2.*pi3+(p1.^2-2*p0*p2).*pi3*pi0+p2.^2.*pi1*pi0;
JD=(2*pi0*pi3).*(pi1.*pi2-pi0*pi3);
J=(JN1+tau^2*JN2)./JD;

```

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

[1] М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук, та М. І. Когутяк, «Синтез лінеаризованих математичних моделей нагрівника з проміжним теплоносієм», *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, вип. 3, с. 144–153, 2023. doi: 10.31891/2219-9365-2023-75-17.

[2] М. І. Горбійчук та М. З. Василенчук, "Синтез структурної схеми нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування," *ВІСНИК ХНТУ. Інженерні науки*, № 4(87), с. 44–52, 2023. doi: 10.35546/kntu2078-4481.2023.4.5.

[3] М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук та М. І. Когутяк, "Система автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику," *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 4, с. 314–331, 2024. doi: 10.31891/2219-9365-2024-80-39.

[4] M. I. Horbiichuk, M. Z. Vasylenchuk and I. Kohutiak, "Analytical studies on dynamic properties of indirect oil heaters," *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 6, pp. 151–157, 2024. doi: 10.33271/nvngu/2024-6/151.

[5] М. Горбійчук, М. Василенчук та М. Когутяк, "Дослідження динамічних властивостей непрямого нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування," *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, № 2(49), с. 29–40, 2024. doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321350.

[6] M. Horbiichuk, M. Vasylenchuk, I. Yednak and A. Lahoida, "Devising a combined method for setting PI/PID controller parameters for oil and gas facilities," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 2(133), pp. 85–95, 2025. doi: 10.15587/1729-4061.2025.322424.

[7] М. Василенчук та М. Горбійчук, "Структурно-параметричний синтез системи автоматичного керування шляховим нагрівником нафти," *Herald of*

Khmelnitskyi National University. Technical Sciences, т. 355, № 4, с. 112–119, 2025.
doi: 10.31891/2307-5732-2025-355-16.

[8] М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук та М. І. Когутяк, "Інваріантна система автоматичного керування шляховим нагрівачем нафти," *ВІСНИК ХНТУ. Інженерні науки*, т. 1, № 3(94), с. 57–69, 2025. doi: 10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.7.

[9] М. І. Горбійчук та М. З. Василенчук, "Лінеаризована математична модель підігрівника з проміжним теплоносієм," у *Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості»*, Івано-Франківськ, 12 жовт. 2023, с. 205–207.
<https://drive.google.com/file/d/12EjNUZT030GWRivLTyI96qJ4svGTnCgp/view>.

[10] М. І. Горбійчук та М. З. Василенчук, "Синтез структурної схеми нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування," у *X Міжнар. наук.-практ. конф. «Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки та освіти»*, Львів, 9–10 січ. 2024, с. 74–76. <http://www.lviv-forum.inf.ua/save/2024/9-10.01/Збірник.pdf>.

[11] М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук та М. І. Когутяк, "Дослідження динамічних властивостей непрямого нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування," у *Всеукр. інтернет-конф. молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості»*, Івано-Франківськ, 10 жовт. 2024, с. 50–52. https://drive.google.com/file/d/1XrD-obOLO_MBz3DuotBYS4S7fKqycmFS/view.

[12] М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук та М. І. Когутяк, "Система автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику," у *Proc. 16th Int. Scientific and Practical Internet Conf. «Modern Movement of Science»*, Dnipro, Oct. 14–15, 2024, pp. 140–142. <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2024/10/Conference-Proceedings-October-14-15-2024-1.pdf>.

[13] M. Horbiichuk and M. Vasylenchuk, "Structural and parametric synthesis of an automatic control system for a line oil heater," in *Abstracts of XXXI Int. Scientific and Practical Conf.*, Munich, Germany, Aug. 4–6, 2025, pp. 88–89.

<https://eu-conf.com/wp-content/uploads/2025/06/SCIENTIFIC-TRENDS-IN-THE-DEVELOPMENT-OF-MODERN-EDUCATION.pdf>.

[14] M. I. Horbiichuk, M. Z. Vasylenchuk and M. I. Kohutiak, "Analytical studies on the dynamic properties of indirect oil heaters," in *7th Int. Scientific and Practical Internet Conf. «Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Summer Debates»*, Dnipro, Ukraine, Aug. 7–8, 2025, pp. 19–20.

<http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2025/08/Conference-Proceedings-August-7-8-2025-1.pdf>.

[15] М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук та М. І. Когутяк, "Інваріантна система автоматичного керування шляховим нагрівачем нафти," у *Всеукр. інтернет-конф. молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості»*, Івано-Франківськ, 9 жовт. 2025, с. 36–38.

<https://drive.google.com/file/d/1sim7SKa62RzaS5XZrTGt248h5VAFfIWQ/view>.

ДОДАТОК Н

**Акт про використання у навчальному процесі кафедри
"Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" ІФНТУНГ
результатів дисертаційної роботи**

ЗАТВЕРДЖУЮ



Ігор ЧУДИК

07 2025 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
аспіранта Василенчука М. З.

*«Математичне моделювання і синтез системи автоматичного керування
підігрівником з проміжним носієм»*

Ми, що нижче підписалися, декан факультету автоматизації та енергетики к. ф.-м. н., доц. Мазур М. П., завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій (АКІТ), к.т.н., доц. Лагойда А. І. та аспірант кафедри АКІТ Василенчук М. З. склали цей акт у тому, що матеріали дисертації *«Математичне моделювання і синтез системи автоматичного керування підігрівником з проміжним носієм»* аспіранта Василенчука М. З. впроваджені в навчальний процес при вивченні дисципліни «Теорія автоматичного керування» і «Автоматизація технологічних процесів та виробництв» для студентів спеціальності G7-Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка.

Декан факультету автоматизації та

енергетики, ф.-м. н., доц.

Завідувач кафедри АКІТ,

к.т.н., доц.

Аспірант

Мирослав МАЗУР

Андрій ЛАГОЙДА

Михайло ВАСИЛЕНЧУК