

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПм-59.00.00.000 ПЗ

Група АКПм-24-2

Володимир Сусловський

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Суловський Володимир Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5:621.181

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення автоматизованої системи керування водогрійним котлом

(назва роботи)

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(назва освітньої програми)

174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм-24-2

(шифр групи)

(підпис)

В.Р. Суловський

(дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

к.т.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Л.І. Фешанич

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

к.т.н., доцент

(посада)

(підпис)

(дата)

Л. Я. Чигур

(ініціали та прізвище)

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістерський

Спеціальність 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та

(шифр і назва)

робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

«___» _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Сусловському Володимирі Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматизованої системи керування водогрійним котлом

керівник роботи Фешанич Лідія Ігорівна, канд. техн. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 10.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Опис технологічного процесу, технологічна схема, статті науково – технічних журналів, збірники, підручники.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз принципу роботи та системи автоматизації водогрійного котла

2. Створення математичної моделі водогрійного котла

3. Аналіз і синтез системи керування котельнею

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 20.11.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз принципу роботи та системи автоматизації водогрійного Котла	1.10.2025	
2	Створення математичної моделі водогрійного котла	1.11.2025.	
3	Аналіз і синтез системи керування котельнею	02.12.2025	

Студент _____
(підпис)

Сусловський В.Р. _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Фешанич Л.І. _____
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі розглянуто проблему розроблення системи автоматичного регулювання газової водонагрівальної котельні. В технологічній частині проведено аналіз принципу роботи водогрійного котла, визначено основні технічні характеристики об'єкта автоматизації та сформульовано вимоги до системи керування. Розроблено функціональну схему автоматизації, що відображає структуру інформаційних та керуючих зв'язків між технологічним обладнанням та засобами автоматизації.

Для побудови математичної моделі котла використано інструменти MATLAB System Identification Toolbox, що дозволило виконати структурну та параметричну ідентифікацію об'єкта. На основі отриманої моделі проведено моделювання роботи розімкненої та замкненої системи автоматичного керування, а також дослідження стійкості за першим методом Ляпунова.

У межах синтезу системи керування реалізовано налаштування регуляторів за методом Циглера—Нікольса (ZN1) та генетичним алгоритмом. Виконано порівняльний аналіз отриманих результатів, що показав переваги використання генетичного алгоритму для оптимізації параметрів регулювання. Сформульовано критерії якості та запропоновано алгоритми визначення параметрів регуляторів. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності роботи газових водонагрівальних котелень та оптимізації сучасних систем автоматичного керування технологічними процесами.

Ключові слова: система автоматичного керування; ідентифікація; математична модель; водогрійний котел; стійкість; показники якості; генетичний алгоритм; оптимізація регулятора

ANNOTATION

This master's thesis examines the problem of developing an automatic control system for a gas-fired water-heating boiler plant. In the technological section, the operational principles of the water-heating boiler are analyzed, the main technical characteristics of the automation object are identified, and the requirements for the control system are formulated. A functional automation scheme has been developed, reflecting the structure of informational and control links between the technological equipment and the automation devices.

To construct the mathematical model of the boiler, the MATLAB System Identification Toolbox was used, which enabled structural and parametric identification of the control object. Based on the obtained model, simulations of both open-loop and closed-loop automatic control systems were performed, as well as a stability analysis using the first Lyapunov method.

Within the framework of control system synthesis, regulator tuning was carried out using the Ziegler–Nichols method (ZN1) and a genetic algorithm. A comparative analysis of the obtained results demonstrated the advantages of using a genetic algorithm for optimizing control parameters. Quality criteria were formulated, and algorithms for determining regulator parameters were proposed. The obtained results can be applied to improve the efficiency of gas-fired water-heating boiler plants and to optimize modern automatic control systems for technological processes.

Keywords: automatic control system; identification; mathematical model; water-heating boiler; stability; quality indicators; genetic algorithm; regulator optimization

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1	
АНАЛІЗ ПРИНЦИПУ РОБОТИ ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВОДОНАГРІВАЛЬНОГО КОТЛА.....	14
1.1. Опис об'єкта автоматизації	14
1.2. Газовий водонагрівальний котел	15
1.3. Система керування автоматизованою газовою водогрійною котельнею	19
1.4. Вимоги до системи керування.....	20
1.5. Розробка функціональної схеми автоматизації.....	22
Висновки до розділу 1.....	23
РОЗДІЛ 2	
СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВОДОНАГРІВАЛЬНОГО КОТЛА.....	24
2.1. Побудова математичної моделі водонагрівального котла на основі структурної та параметричної ідентифікації.....	24
2.2. Структурна схема.....	27
Висновки до розділу 2.....	48
РОЗДІЛ 3	
АНАЛІЗ І СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОТЕЛЬНЕЮ.....	50
3.1. Дослідження стійкості першим методом Ляпунова для розімкненої та замкненої систем.....	50
3.2. Оцінки прямих і непрямих показників якості системи керування.....	
3.3. Синтез системи керування на основі методів ZN1 та генетичного алгоритму.....	
Висновки до розділу 3.....	64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	66

ВСТУП

Актуальність теми.

Підвищення ефективності, надійності та безпеки роботи водогрійних котлів є одним з ключових завдань сучасної теплоенергетики. Газові водонагрівальні котельні широко застосовуються у системах централізованого та автономного теплопостачання, що зумовлює необхідність удосконалення методів керування їхніми технологічними процесами. Традиційні системи регулювання, які ґрунтуються переважно на статичних алгоритмах або ручному втручанні, не забезпечують достатньої точності, швидкодії та адаптивності в умовах зміни навантаження, параметрів робочого середовища та зовнішніх факторів.

У сучасних умовах особливого значення набувають автоматизовані системи керування, здатні стабілізувати тепловий режим, мінімізувати витрати газу та підвищувати енергоефективність обладнання. Використання математичного моделювання, методів ідентифікації та інтелектуальних алгоритмів оптимізації дає змогу створювати регулятори нового покоління, що адаптуються до реальних характеристик об'єкта та забезпечують оптимальні показники якості керування. Саме тому розроблення автоматизованої системи керування водогрійним котлом, яка базується на сучасних методах аналізу та синтезу, є актуальною науково-технічною задачею.

Крім того, підвищення рівня автоматизації котелень сприяє зменшенню експлуатаційних витрат, покращенню екологічних показників і зниженню ймовірності аварійних ситуацій. Це особливо важливо в умовах зростаючих вимог до безпеки та ефективності енергетичних систем, а також у контексті модернізації українських теплопостачальних підприємств.

Обґрунтування вибору теми дослідження

Вибір теми дослідження зумовлений сучасними тенденціями розвитку теплоенергетики та підвищеними вимогами до ефективності, безпеки й надійності роботи водогрійних котлів. Газові водонагрівальні котельні є основою систем теплопостачання в промислових, комунальних та побутових об'єктах, тому їх

оптимальна експлуатація безпосередньо впливає на енергетичну стабільність і економічну ефективність підприємств. У зв'язку з цим виникає необхідність удосконалення систем автоматичного керування, що дозволяють мінімізувати людський фактор, підвищити точність регулювання та забезпечити стабільність теплотехнічних процесів.

Традиційні методи керування часто не враховують нелінійність, інерційність і динамічну змінність об'єкта, що призводить до погіршення якості регулювання та збільшення енергоспоживання. У свою чергу, застосування сучасних засобів моделювання, методів ідентифікації та алгоритмів оптимізації відкриває нові можливості для побудови адаптивних і високоточних систем керування водогрійними котлами. Використання таких інструментів, як MATLAB System Identification Toolbox, та впровадження інтелектуальних методів налаштування регуляторів, зокрема генетичних алгоритмів, дозволяє розробити систему керування, що значно перевищує за якісними показниками традиційні підходи.

Додатковим фактором вибору теми є актуальність модернізації теплогенерувальних установок в Україні, де існує потреба у підвищенні енергоефективності та зменшенні експлуатаційних витрат у теплопостачальних системах. Розроблення сучасної автоматизованої системи керування водогрійним котлом відповідає стратегічним напрямам енергозбереження та цифровізації промислових процесів.

Отже, тема дослідження є обґрунтованою як із наукової, так і з практичної точки зору, оскільки спрямована на створення інноваційної системи керування, здатної забезпечити підвищення ефективності та надійності роботи водогрійних котлів при одночасному зниженні енергетичних та експлуатаційних витрат.

Мета і завдання дослідження.

Метою даної роботи є розроблення системи автоматичного регулювання газової водонагрівальної котельні, що забезпечить підвищення продуктивності, стабільності та якості функціонування технологічного процесу.

Об'єктом дослідження

Зміна температури води у в промисловому агрегаті.

Предметом дослідження

Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми побудови й оптимізації автоматизованої системи керування водогрійним котлом, а також динамічні характеристики об'єкта керування.

Основні завдання дослідження

- провести аналіз системи автоматичного регулювання температури в промисловому теплотехнічному агрегаті.
- виконати синтез оптимального регулятора з метою досягнення найкращих показників якості перехідного процесу.
- провести порівняльний аналіз результатів моделювання для оцінки ефективності обраних методів керування.

Методи дослідження

У процесі виконання дослідження застосовувався комплекс методів, що дозволив забезпечити всебічний аналіз об'єкта автоматизації та обґрунтованість розробленої системи керування водогрійним котлом. На початковому етапі проводився аналіз літературних і нормативних джерел, що дало змогу сформулювати уявлення про конструктивні особливості водогрійних котлів, їх теплотехнічні характеристики, сучасні підходи до автоматизації та вимоги до безпеки їх експлуатації. Це стало базою для подальшого системного аналізу структури котла та виявлення основних параметрів, які найбільше впливають на його динамічні властивості.

Подальше дослідження передбачало створення математичної моделі об'єкта, що вимагало застосування методів математичного моделювання, а також структурної та параметричної ідентифікації. З використанням інструментів MATLAB System Identification Toolbox було отримано модель, що адекватно відображає поведінку котла в різних режимах. На основі цієї моделі виконувалося чисельне моделювання у середовищі MATLAB/Simulink, яке дало можливість простежити зміну параметрів системи під час перехідних процесів, а також порівняти реакції для різних схем керування.

Особлива увага приділялась дослідженню стійкості системи автоматичного регулювання, для чого використовувався перший метод Ляпунова. Це дозволило оцінити умови стабільної роботи як розімкненої, так і замкненої системи. Паралельно проводилося оцінювання прямих і непрямих показників якості регулювання, що дало змогу визначити точність, швидкодію та надійність роботи системи в різних умовах.

На етапі синтезу системи керування застосовувалися різні методи налаштування регуляторів. Зокрема, використовувався класичний метод Ціглера—Ніколса, а також інтелектуальний метод оптимізації на основі генетичного алгоритму. Порівняння результатів, отриманих за допомогою цих методів, здійснювалося шляхом аналізу перехідних процесів і інтегральних показників якості, що дозволило визначити найбільш ефективний підхід до регулювання температури водонагрівального котла.

Застосування таких різноманітних та взаємодоповнюючих методів забезпечило глибину проведеного дослідження, об'єктивність оцінювання результатів та підтвердило ефективність запропонованої системи автоматичного керування.

Наукова новизна отриманих результатів

Новизна дослідження полягає у модифікації генетичного алгоритму шляхом інтеграції штрафних функцій із класичним критерієм якості, що підвищує точність і стабільність процесу оптимізації. Окрім цього, проведено аналітичне та експериментальне дослідження методу Ціглера—Ніколса №1, за результатами якого було розроблено алгоритми оптимізації параметрів ПІД-регуляторів.

Практичні значення отриманих результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для підвищення ефективності та точності роботи автоматизованих систем керування водогрійними котлами. Розроблена математична модель і методи оптимізації параметрів регулятора можуть бути впроваджені у промислові системи теплопостачання для зменшення енергетичних витрат. Отримані алгоритми та

підходи також можуть слугувати базою для подальших досліджень і модернізації теплотехнічного обладнання.

Структура та обсяг магістерської роботи.

Робота складається зі вступу, трьох основних розділів, висновків і списку використаних джерел, що охоплює 72 сторінку основного тексту, включає 34 рисунки, 5 таблиць і 8 літературних джерел.

-РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРИНЦИПУ РОБОТИ ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА

1.1. Опис об'єкта автоматизації

Котел — це герметичний теплообмінний апарат, призначений для нагрівання води або утворення пари за рахунок теплової енергії, що виділяється під час згоряння палива. Отримана гаряча вода чи пара під тиском далі використовується у виробничих процесах або для побутових потреб.

Водонагрівальні котли є технічно складними пристроями, які широко застосовуються для опалення та гарячого водопостачання у будівлях різного призначення. Залежно від потужності та типу енергоносія, котли можуть використовуватись як у приватних будинках, так і на великих промислових об'єктах.

Принцип роботи водогрійного котла базується на перетворенні енергії палива у теплову, що передається воді, яка циркулює у системі. Після досягнення заданої температури вода подається до системи опалення або споживачів гарячої води.

Існують різні типи водонагрівальних котлів, які відрізняються за типом палива, потужністю, конструкцією та способом встановлення:

- електричні котли — прості у використанні, працюють за принципом перетворення електричної енергії на теплову. Використовуються переважно у невеликих приміщеннях або системах з низьким навантаженням.

- твердопаливні котли — застосовують дрова, вугілля, торф або біомасу. Відрізняються високою енергонезалежністю та економічністю, часто використовуються у великих будівлях (школи, лікарні, виробництва).

- газові котли (рис. 1.1) — найпоширеніший тип, що працює на природному або зрідженому газі. Вони характеризуються високим ККД, компактністю та зручністю автоматизації.



Рис. 1.1 – Загальний вигляд термомасляної котельні

Вибір типу котла визначається умовами експлуатації, доступністю енергоносія та економічними показниками. Для підвищення ефективності та безпеки роботи котельного обладнання розробляються системи автоматизованого керування, що дозволяють:

- підтримувати задану температуру води;
- регулювати подачу палива та повітря;
- контролювати роботу насосів і клапанів;
- здійснювати моніторинг параметрів і вчасно реагувати на аварійні ситуації.

Автоматизація котельної здійснюється за допомогою системи керування, яка складається з датчиків, контролера, виконавчих механізмів та програмного забезпечення.

- Датчики збирають інформацію про температуру, тиск, рівень палива тощо.
- Контролер аналізує дані, формує керуючі сигнали та передає їх виконавчим пристроям.
- Виконавчі механізми (насоси, клапани, електроприводи) реалізують необхідні дії.
- Програмне забезпечення забезпечує логіку роботи, інтерфейс оператора та архівацію даних.

Таким чином, автоматизація водогрійного котла — це комплексна система, яка об'єднує апаратні й програмні засоби для забезпечення стабільної, економічної та безпечної роботи теплотехнічного обладнання.

1.2. Газовий водогрійний котел

Вибір типу водогрійного котла залежить від багатьох чинників, таких як вимоги до потужності, наявність джерела палива, економічна доцільність та умови експлуатації.

У межах даної роботи розглядається розробка системи автоматизованого керування газовою водогрійною котельнею, що передбачає не лише забезпечення надійної та безпечної роботи котла, а й оптимізацію його експлуатації та ефективне використання енергоресурсів.

Газові котли, як уже зазначалося, мають високий коефіцієнт корисної дії (ККД), надійність у роботі та компактні габарити порівняно з твердопаливними аналогами. Крім того, використання газового палива є більш екологічно безпечним варіантом, оскільки під час його згоряння практично не утворюється сажі, диму або золи.

З погляду екології, природний газ є оптимальним видом палива. Хоча він може містити незначну кількість негорючих компонентів (азот, вуглекислий газ), він майже не утворює твердих відходів і забезпечує повне згоряння при правильному змішуванні з повітрям. Єдиною особливістю природного газу є відносно високий вміст водню (понад 20 % за масою), що відрізняє його від інших видів викопного палива, таких як вугілля чи нафта [1].

Отже, вибір газового водогрійного котла у межах даної дипломної роботи є обґрунтованим як з погляду енергетичної ефективності, так і екологічної безпеки. Крім того, природний газ є доступним і поширеним видом палива, що робить його доцільним для використання в системах автоматизованого керування теплотехнічним обладнанням.

Окрім природного газу, для живлення котлів можуть використовуватися інші види газів, однак їхня вартість переробки часто є надто високою для промислового застосування. Як альтернативу можуть виступати попутні нафтові гази, переробний газ, скраплений вуглеводневий газ (пропан, бутан), отримані в процесі переробки природного газу або нафти.

1.3. Система керування автоматизованою газовою водогрійною котельнею

Система керування автоматизованою газовою водогрійною котельнею — це комплекс технічних засобів, що забезпечує стабільну, безпечну й економічну роботу котла, а також оптимізацію витрат енергії та ресурсів.

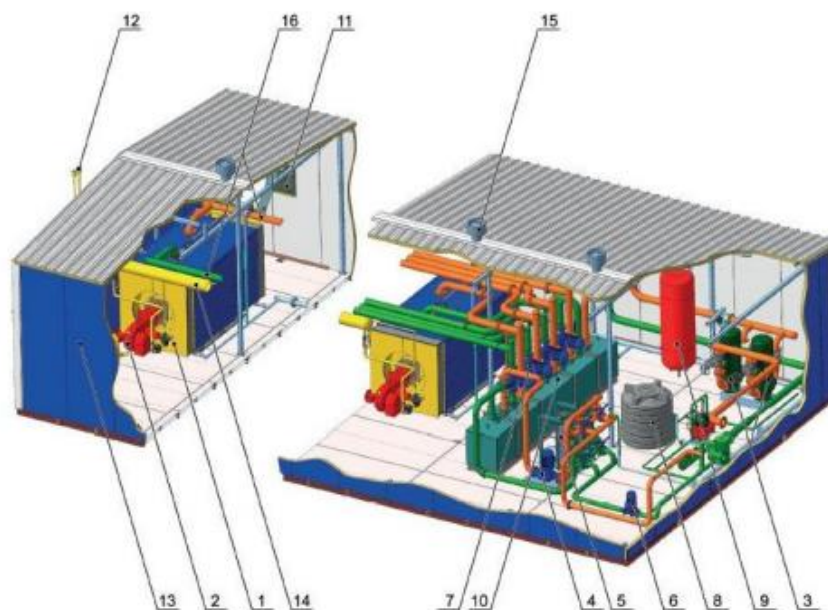
На рисунку 1.2 подано схему водонагрівальної установки, яка складається з двох газових котлів і допоміжного обладнання, необхідного для стабільного функціонування котельні. Кожен котел має власну систему керування, що автоматично контролює температуру теплоносія, тиск, подачу газу та роботу циркуляційних насосів.

До основних складових промислової водогрійної установки належать:

- Котел — основний елемент, у якому відбувається процес згоряння газу й передача тепла теплоносію. У котлі встановлено датчики температури, тиску, витрати газу тощо. Отримані сигнали надходять до контролера, який обробляє інформацію та формує керуючі команди.

- Пальний — пристрій для змішування газу з повітрям і його спалювання. Система керування регулює співвідношення «газ–повітря», забезпечуючи повне згоряння й мінімальні викиди.

- Теплообмінник — елемент, який передає теплову енергію від продуктів згоряння до води.



1 - водогрійний котел; 2 – газовий пальник; 3 - мережеві насоси, 4 – гріючий насос; 5 – підігрівачі; 6 – насос; 7 -котловий насос; 8 – бак запасу води; 9 – бак; 10 – гідророзділювач; 11 - жалюзійна ґратка; 12 – продувні свічки; 13 – приміщення котельні; 14 – газовий колектор; 15 – дефлектори; 16 -магістраль котлового контуру

Рис. 1.2 – Загальний вигляд термомаєляної котельні в розрізі

- Насоси, розширювальний бак, системи захисту від перегріву та аварійного вимкнення — забезпечують безперебійну роботу котельні.

Сучасні газові котли часто є конденсаційними, що дозволяє використовувати тепло парів води з відпрацьованих газів, збільшуючи ККД до 95–98 %.

Газова система

Газова система забезпечує подачу, фільтрацію, вимірювання та регулювання кількості палива, що надходить у котел. Вона складається з:

- газопроводів, виготовлених із корозійностійких матеріалів;
- газових фільтрів, що очищають паливо від домішок;
- регулювальних і запірних клапанів;
- газових лічильників для обліку витрати;

- датчиків витоку газу і системи автоматичного відключення у разі аварійної ситуації.

Для забезпечення безпеки робочий тиск і подачу газу контролюють регулятори тиску. Також передбачено систему відведення відпрацьованих газів (димохід або витяжна установка), що відповідає вимогам екологічної та пожежної безпеки.

Система керування

Система керування є центральною частиною автоматизованої котельні й забезпечує координацію роботи всіх її елементів. До її складу входять:

- Контролер — центральний обчислювальний пристрій, який приймає дані від датчиків, аналізує їх і видає команди виконавчим механізмам.

- Датчики — вимірюють температуру, тиск, витрату газу, рівень води, концентрацію токсичних викидів тощо.

- Виконавчі механізми — реалізують команди контролера (насоси, клапани, вентилятори, заслінки).

- Програмне забезпечення — реалізує логіку керування, алгоритми регулювання, моніторинг, дистанційний контроль і реєстрацію даних.

Система може використовувати адаптивні та модульовані алгоритми керування, які дозволяють автоматично змінювати потужність котла відповідно до теплового навантаження. Це забезпечує економію газу та зменшення зносу обладнання.

Система безпеки

Система безпеки відіграє ключову роль у роботі котельні. До її основних функцій належать:

- автоматичне відключення подачі газу при перевищенні допустимого тиску, температури або виявленні витоку;

- резервування критичних елементів (дублюючі датчики, аварійні клапани);

- система пожежогасіння та захисту від вибухів;

- електрозахист і аварійне відключення у разі збою електроживлення;

- регулярне технічне обслуговування й навчання персоналу правилам безпечної експлуатації.

У разі аварійної ситуації система миттєво блокує роботу котла, інформує оператора та запобігає пошкодженню обладнання.

Система моніторингу

Система моніторингу призначена для спостереження за станом усіх підсистем котельні, проведення діагностики в реальному часі та архівації параметрів роботи.

Вона може включати сенсорні панелі, дисплеї, програмні інтерфейси SCADA, що дають змогу оператору контролювати всі показники та оперативно реагувати на відхилення.

Моніторинг процесів дозволяє забезпечити високий рівень надійності, безпеки та енергоефективності роботи котельні.

Усі складові системи автоматизованого керування газовою водогрійною котельнею працюють у взаємодії, утворюючи єдиний технологічний комплекс, який забезпечує оптимальний режим горіння, стабільну подачу тепла, мінімізацію енергоспоживання та екологічну безпеку.

1.4. Вимоги до системи керування

Автоматизована система керування котельнею повинна відповідати певним вимогам для забезпечення її безпечної та ефективної роботи. Основні вимоги до автоматизованої системи керування котельнею включають:

- надійність і стабільність роботи системи. Система повинна бути спроектована та налаштована таким чином, щоб вона працювала без збоїв і перебоїв, а також могла стабільно функціонувати протягом тривалого періоду часу;
- висока точність вимірювань і керування. Автоматизована система керування повинна забезпечувати точне вимірювання та регулювання параметрів роботи котла, таких як температура, тиск, витрата газу тощо;

- простота та зручність використання. Система повинна бути простою в експлуатації та мати зручний користувацький інтерфейс, який дозволить оператору керувати котельнею без зайвих труднощів;
- безпека та захист від аварійних ситуацій. Система повинна бути оснащена комплексом безпеки, який контролює параметри роботи котла та, у разі потреби, автоматично зупиняє його роботу для запобігання можливим аваріям;
- ефективність. Система повинна забезпечувати раціональне використання газу та інших ресурсів, таких як електроенергія і вода.

1.5. Розробка функціональної схеми автоматизації

Схеми автоматизації є основним технічним документом, що визначає функціонально-блокову структуру окремих елементів систем автоматичного керування, контролю та регулювання технологічного процесу, а також об'єктів керування обладнанням і засобами автоматизації (включаючи телемеханіку та обчислювальну техніку).

Функціональна схема автоматизації — це графічне зображення всіх функціональних блоків системи автоматичного керування та їх взаємозв'язків, необхідних для виконання всіх вимог і завдань у системі керування. Вона є важливим інструментом для проєктування та розуміння принципів роботи автоматизованих систем, оскільки дозволяє визначити структуру і взаємодію компонентів системи [2].

Кожен блок у схемі представляє певну функцію або процес. Така схема дозволяє легко зрозуміти взаємозв'язки між пристроями та процесами в системі автоматизації, а також спрощує її проєктування, налагодження та технічне обслуговування. У функціональній схемі автоматизації вказуються джерела сигналів, напрямки їх передачі, а також взаємозв'язки між пристроями та процесами системи.

Під час розробки схем автоматизації для котельних установок керуються нормативно-технічною документацією. Додатково використовуються технічні

умови (ТУ), проєктні рішення та схеми раніше створених аналогічних об'єктів автоматизації. Усі ці документи визначають вимоги до проєктування й експлуатації автоматизованих систем котельних установок. Кінцева схема автоматизації повинна враховувати всі ці вимоги та відповідати встановленим нормам і стандартам.

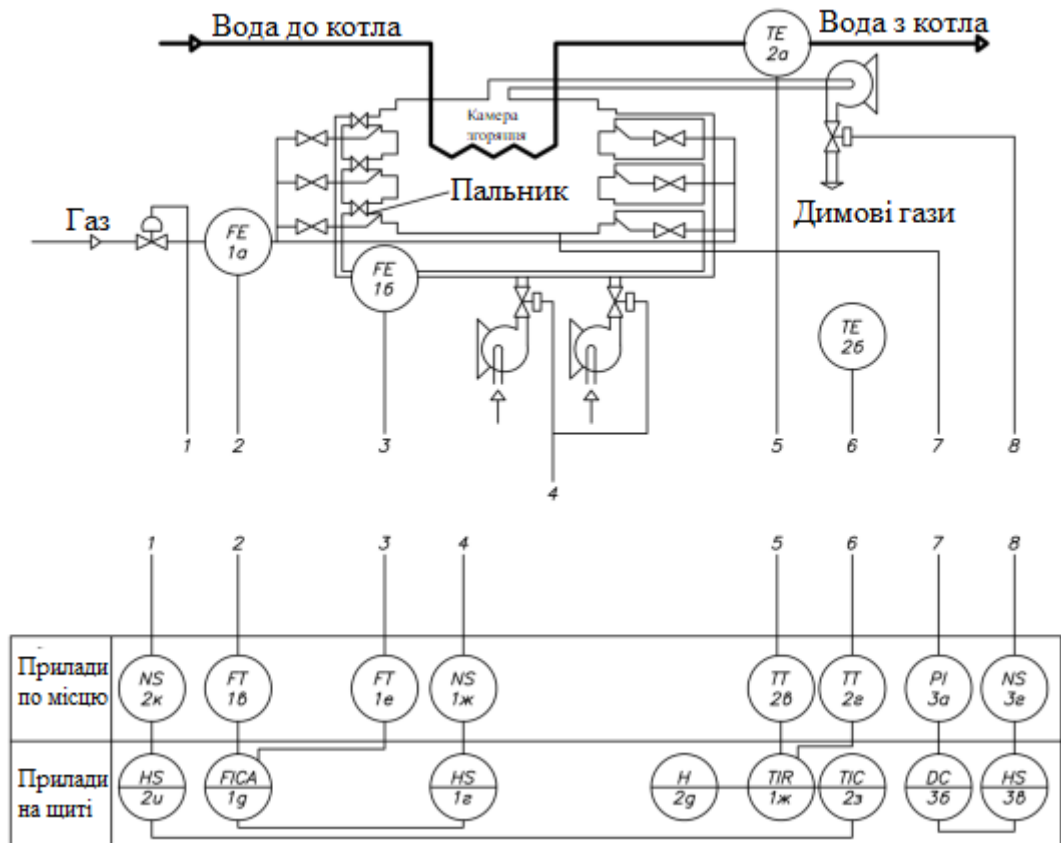


Рис. 1.3 – Функціональна схема автоматизації

Функціональна схема відображає структуру та принцип роботи автоматизованої системи керування водогрійним котлом, що включає підсистеми подачі газу, повітряного забезпечення, теплогенерації, контролю параметрів та захисно-блокувальних механізмів. Система містить комплекс приладів, встановлених безпосередньо на обладнанні, а також апаратуру, розміщену на щиті керування.

Газопаливний тракт починається з лінії підведення газу, на якій встановлено витратомір, призначений для контролю кількості газу, що подається до пальника. Газ надходить у газорозподільний вузол пальника, де за допомогою форсунок

подається у камеру згоряння. Робота пальника супроводжується контролем витрати робочих середовищ за допомогою датчиків витрати, а також контролем положення виконавчих елементів, що забезпечується кінцевими перемикачами. Стан полум'я реєструється і контролюється приладом FICA, що формує сигнали на систему керування у разі відхилення від нормального режиму горіння.

Повітряне забезпечення пальника здійснюється за допомогою двох вентиляторів, розташованих у нижній частині схеми. Вони забезпечують подачу необхідної кількості повітря для згоряння та виконують функцію продувки перед розпалюванням. Їх робота контролюється датчиками стану, що дозволяє реалізувати блокувальні та захисні алгоритми.

Теплоносій (вода) подається до котла через вхідний трубопровід, на якому встановлено температурний датчик. Він визначає температурний рівень води перед надходженням у теплообмінну поверхню котла. Після проходження котла вода підігрівається до заданого рівня, що контролюється датчиком температури на виході. Отримані значення температури використовуються регулятором температури, який форм є керуючі сигнали на пальниковий пристрій з метою підтримання стабільного теплового режиму відповідно до заданих параметрів.

У зоні димових газів встановлено групу температурних датчиків, які забезпечують контроль процесу згоряння та ефективності теплоутилізації. Ці датчики дозволяють оцінювати тепловий стан камери згоряння та своєчасно реагувати на можливі відхилення, що впливають на безпеку роботи котла.

Контроль тиску теплоносія або газового середовища здійснюється датчиками. Такі прилади забезпечують інформування оператора про стан системи та беруть участь у реалізації захисних функцій. Перетворювач температури забезпечує передачу аналогових сигналів на щит керування для подальшої індикації або реєстрації.

Схема структурно поділена на два рівні: прилади, встановлені безпосередньо на обладнанні, та апаратуру, винесену на щит керування. Такий поділ дозволяє оператору отримувати повну інформацію про роботу котла, здійснювати

параметричне регулювання та контролювати стан усіх ключових вузлів, залишаючись поза зоною підвищених температур і тисків.

Таким чином, наведена функціональна схема демонструє комплексну систему автоматизації водогрійного котла, що забезпечує контроль параметрів, керування процесами горіння та підтримання безпечного та ефективного режиму роботи теплотехнічного обладнання.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було здійснено комплексний аналіз принципу роботи водогрійного котла та досліджено основні положення, що визначають побудову сучасних систем його автоматизації. Розглянуто теплотехнічні процеси, які лежать в основі функціонування газового водогрійного котла, а також виявлено ключові параметри, що впливають на ефективність і стабільність його роботи. Аналіз конструктивних особливостей котла дав змогу окреслити основні вузли, від параметрів і режимів роботи яких залежить якість теплоутворення та безпека експлуатації обладнання.

Дослідження системи керування котельною показало, що автоматизація є необхідною умовою забезпечення надійності, економічності та екологічності роботи теплогенерувальної установки. Встановлено, що до складу системи автоматизації входять підсистеми контролю, регулювання, блокування та сигналізації, які взаємодіють між собою для підтримання оптимальних режимів горіння, стабільного теплового навантаження та відповідності нормам безпеки.

У процесі аналізу визначено вимоги до системи керування, які охоплюють функціональну, експлуатаційну та безпекову складові. Показано, що сучасні системи автоматизації мають забезпечувати безперервний моніторинг технологічних параметрів, своєчасне реагування на відхилення та можливість роботи в автоматичному режимі з мінімальним втручанням оператора. Особливу увагу приділено питанням захисту від аварійних ситуацій, контролю полум'я, тиску, витрати газу та температурних характеристик.

Завершальним етапом стало формування функціональної схеми автоматизації, що відображає логічні зв'язки між технологічним обладнанням, засобами контролю та виконавчими механізмами. Схема демонструє структуру керування процесами горіння, регулювання температури теплоносія та контролю параметрів димових газів. Її розроблення дозволило узагальнити результати аналітичної частини та створити основу для подальшого проєктування системи керування.

РОЗДІЛ 2

СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА

2.1. Побудова математичної моделі водогрійного котла на основі структурної та параметричної ідентифікації

Основним завданням автоматичного керування є забезпечення необхідного функціонального зв'язку між керованими змінними, які характеризують стан об'єкта, та керувальними впливами. Цей зв'язок має підтримуватися безперервно або протягом заданого інтервалу часу з необхідною точністю [3].

Для створення математичної моделі об'єкта керування передусім необхідно визначити канал керування, за яким буде формуватися керувальний вплив. У даній роботі обрано вхід, що відповідає витраті газу, який подається до пальника, а вихідною величиною є температура води на виході з котла. Для спрощення моделі приймається, що температура води перед подачею до котла залишається сталою протягом усього проміжку часу.

Експериментальні дані, наведені в таблиці 1.1, отримано на основі моделювання та симуляції газового котла із зовнішнім нагрівом, який використовується для підігріву холодної води.

MATLAB System Identification Toolbox — це програмний пакет, призначений для моделювання динамічних систем і визначення їх параметрів на основі експериментальних даних. Він застосовується для аналізу, моделювання та ідентифікації динамічних систем, побудованих на основі результатів експериментів. Після ідентифікації системи за допомогою MATLAB System Identification Toolbox отриману модель можна використовувати для аналізу та оптимізації системи, а також для прогнозування її поведінки за різних умов експлуатації.

Таблиця 1.1

Вихідні дані

№	Час процесу, T (сек.)	Витрата газу, Q (г/с)	Температура води на виході, t (°C)
1	48	1,873	58,12
2	58	1,974	58,05
3	58	2,118	57,88
4	58	2,179	57,89
5	77	2,141	57,89
6	116	2,135	57,89
7	164	2,107	57,89
8	175	2,057	57,89
...			
230	7749	1,703	68,21
231	7797	1,718	68,52
232	7874	1,684	68,15
233	7884	1,719	66,39
234	7884	1,762	65,27
235	7884	1,761	65,86
236	7884	1,790	65,26

Для зручності аналізу дані були попередньо оброблені та подані у графічному вигляді (рис. 2.1), що дозволяє візуально визначити закономірності зміни параметрів.

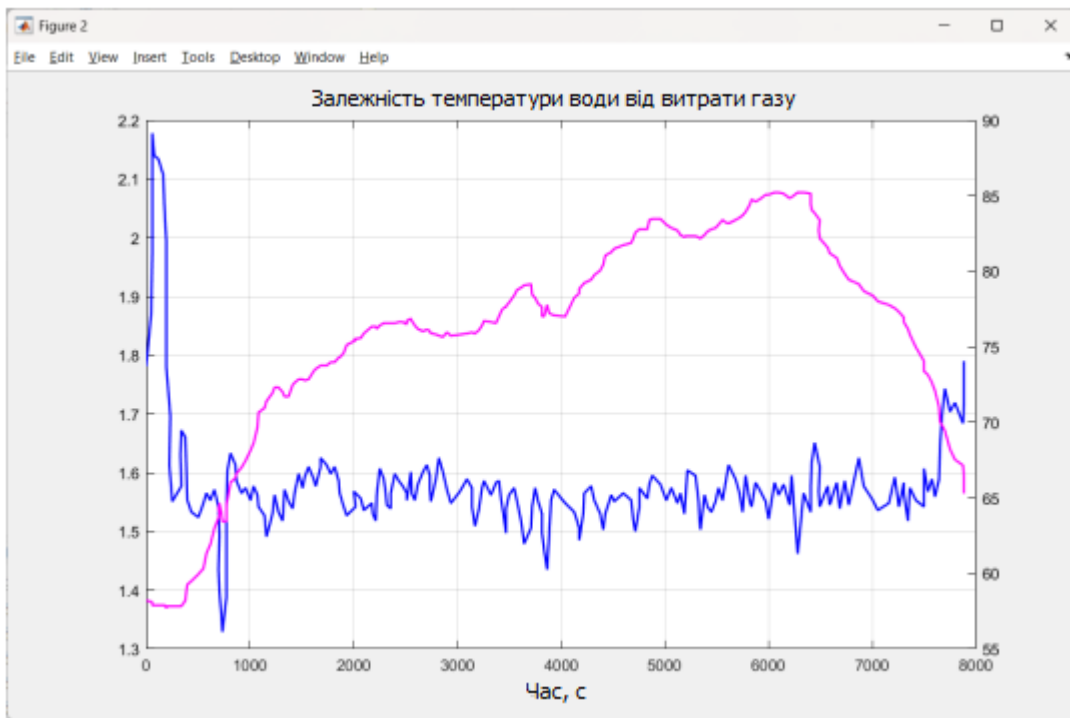


Рис. 2.1 – Графік залежності вихідних даних

Для ідентифікації системи на основі експериментальних даних використано MATLAB System Identification Toolbox (рис. 2.2).

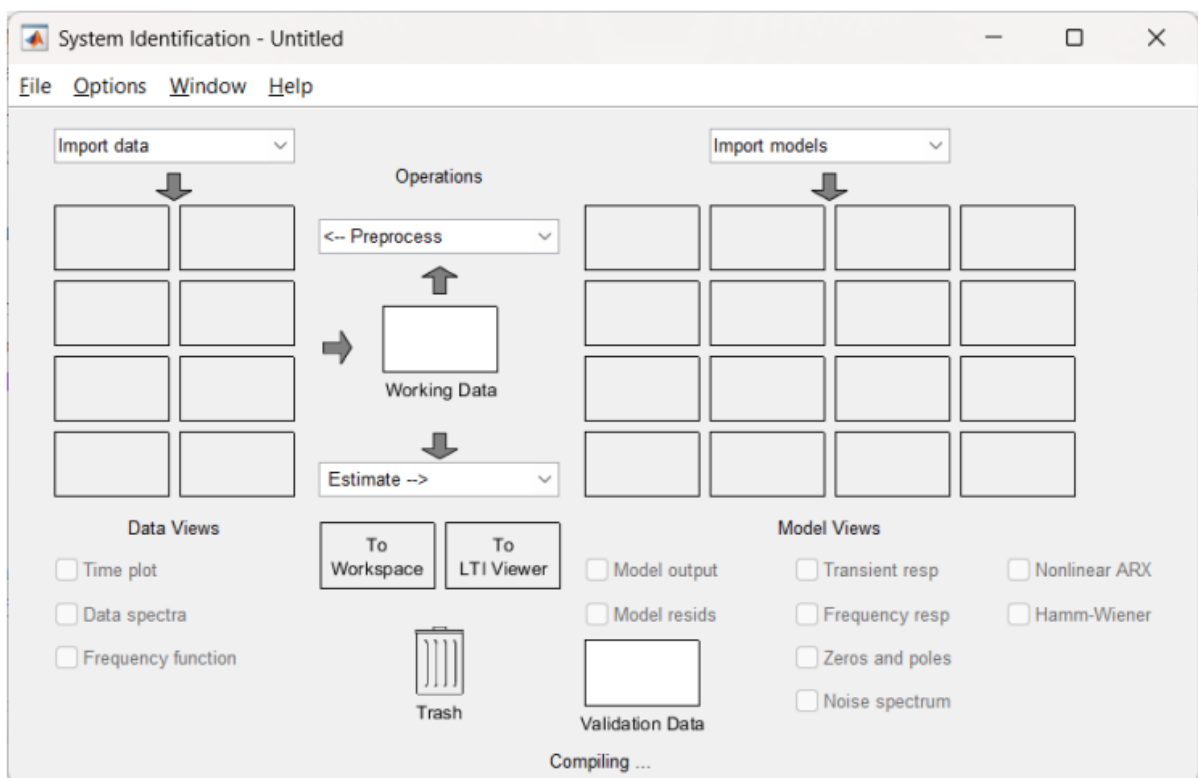


Рис. 2.2 – Вікно проєкту System Identification Toolbox

Спочатку виконується імпорт (рис. 2.3) усіх експериментальних даних. Експериментальні дані необхідно підготувати заздалегідь для імпорту, виділивши окремі нові змінні, що містять відповідні дані.

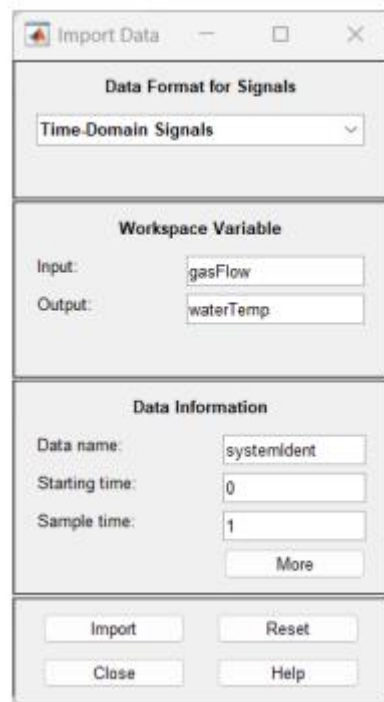


Рис. 2.3 – Вікно імпорту даних

System Identification Toolbox надає зручні інструменти для попередньої обробки даних. Оскільки отримані дані не є ідеальними, виконується вибірка даних для використання в ідентифікації — вибирається проміжок на графіку (рис. 2.4), що відповідає одиничному ступінчастому впливу на систему.

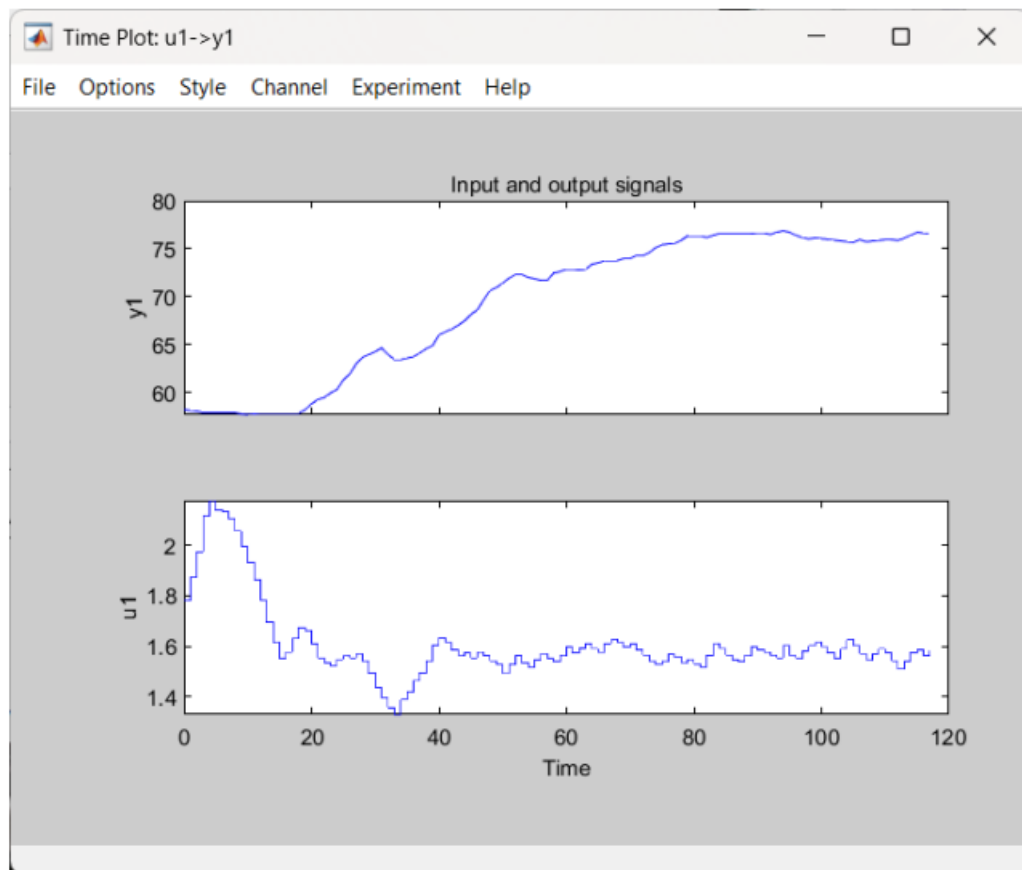


Рис. 2.4 – Графік відібраних даних

Для отримання наближеної передавальної функції реального об'єкта необхідно лише обрати алгоритм ідентифікації та налаштувати його параметри. У даному проєкті застосовуються два підходи до ідентифікації: структурна та параметрична ідентифікація.

Структурна ідентифікація базується на аналізі системи та виборі структури моделі, яка найточніше описує динаміку об'єкта. Шляхом експериментів та аналізу даних визначаються структурні елементи моделі, такі як передавальні функції та зв'язки між ними.

Параметрична ідентифікація передбачає налаштування параметрів моделі таким чином, щоб вона відповідала реальному об'єкту керування. За допомогою алгоритмів та методів оптимізації підбираються значення параметрів моделі для мінімізації розбіжностей між моделлю та експериментальними даними.

На рисунку 2.5 показано інтерфейс із різними результатами, отриманими з використанням алгоритмів ідентифікації.

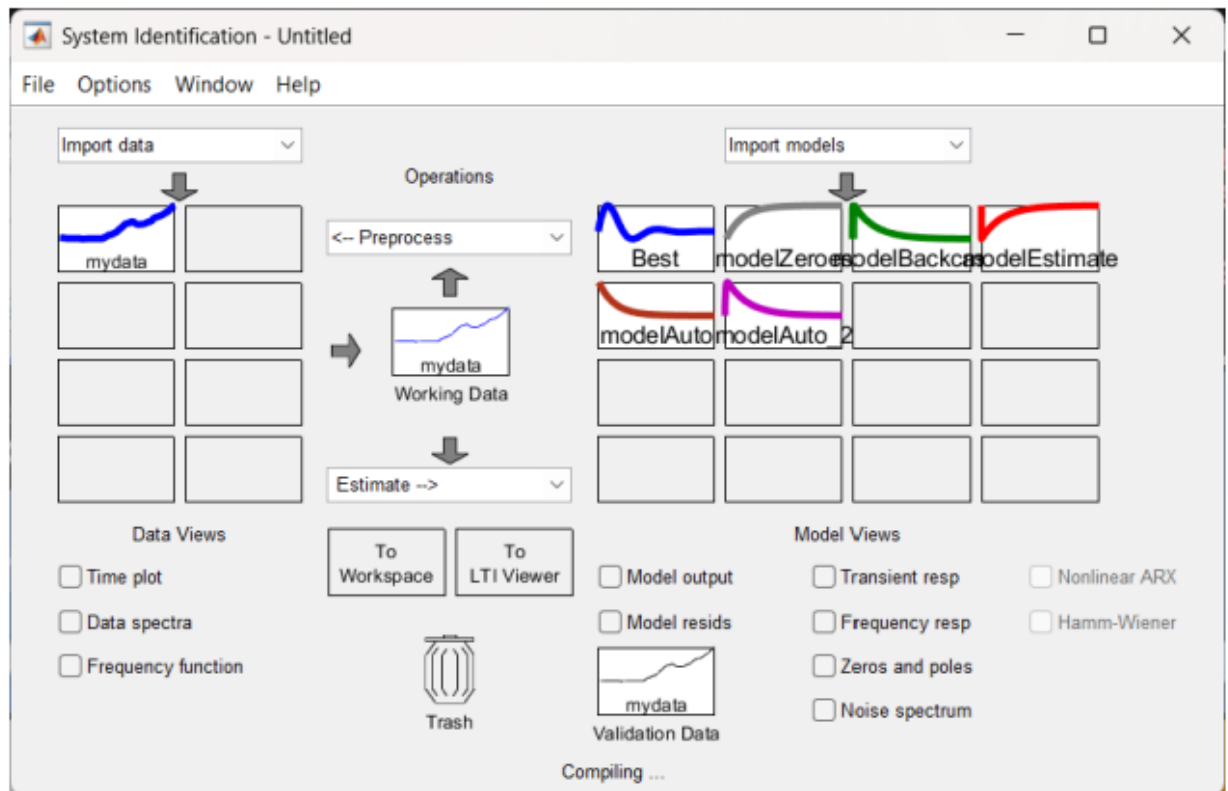


Рис. 2.5 – Вікно проєкту System Identification Toolbox з різними алгоритмами ідентифікації

Мета вибору алгоритму (рис. 2.6) та налаштування його параметрів полягає в тому, щоб отримати передавальну функцію, яка найточніше відображає динаміку системи у відповідь на одиничний ступінчастий вплив.

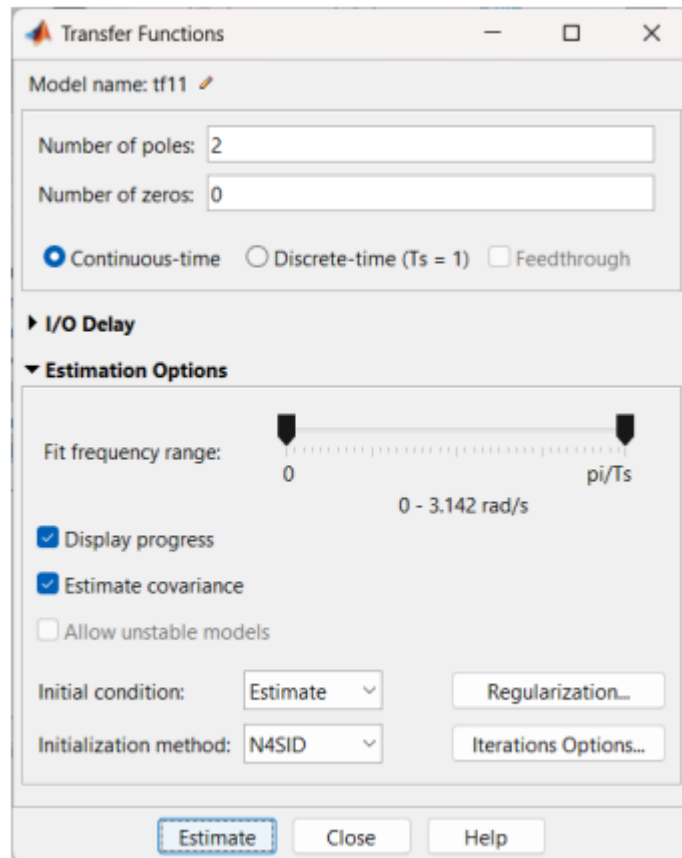


Рис. 2.6 – Вікно налаштувань алгоритму ідентифікації

Після виконання ідентифікації необхідно оцінити якість отриманої моделі (рис. 2.7). Для цього можна використовувати різні метрики, такі як коефіцієнт кореляції, коефіцієнт детермінації, середньоквадратична помилка та інші. Якщо якість моделі є недостатньо високою, потрібно провести додаткові дослідження та коригування параметрів моделі.

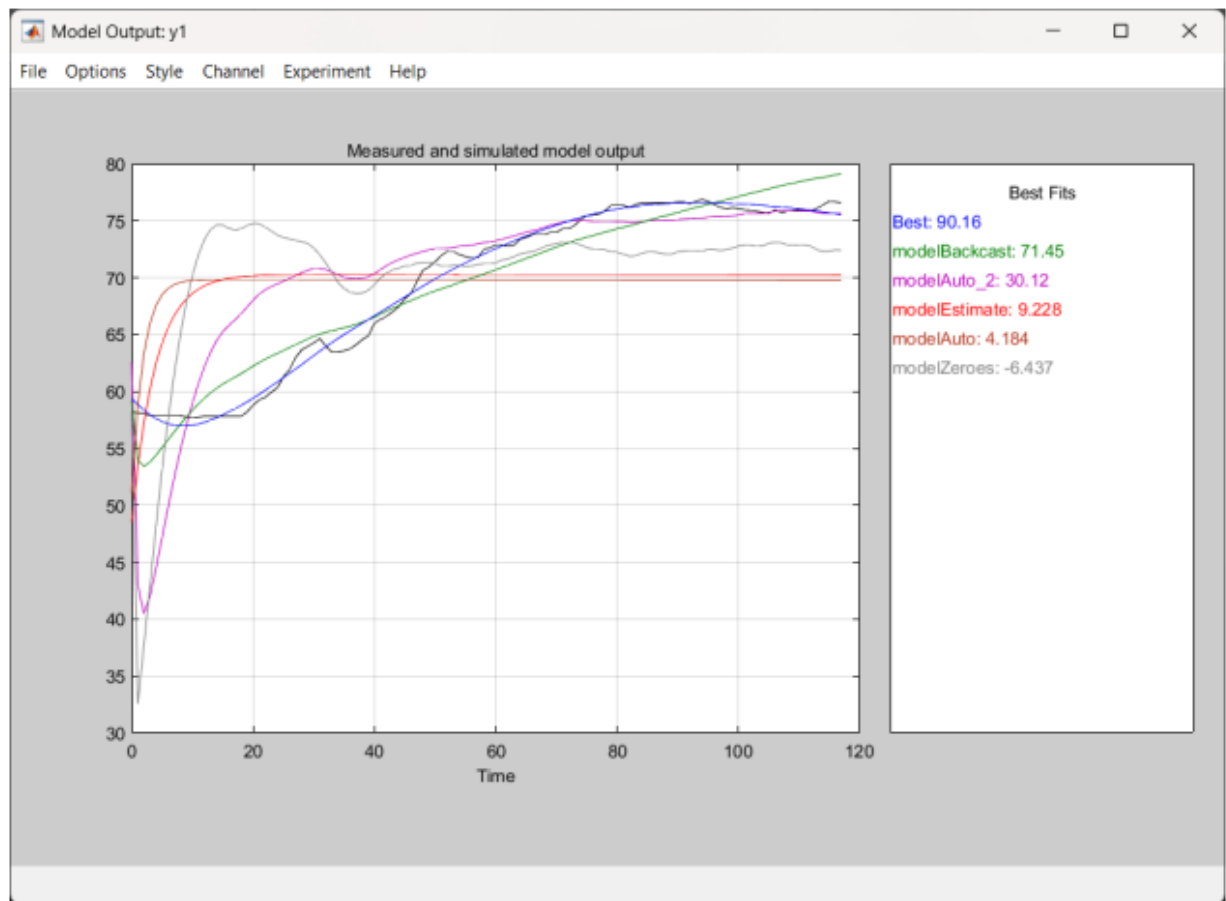


Рис. 2.7 – Графік отриманих перехідних процесів із різними параметрами

Для подальшого, більш коректного проведення досліджень підберемо такі параметри алгоритму, які забезпечують точність понад 85%.

У результаті отримаємо передавальну функцію з точністю 90,16% та середньоквадратичною помилкою (MSE), що дорівнює 0,4967. На рисунку 1.10 зображено метрики моделей із різними алгоритмами ідентифікації.

Ці результати включають графіки порівняльного аналізу модельних і експериментальних даних, а також числові показники, такі як середньоквадратична помилка та коефіцієнт детермінації. Це дає змогу оцінити точність і надійність отриманих наближених моделей та обрати найбільш придатний алгоритм для подальшого синтезу системи керування.

Аналіз представлених результатів дозволяє здійснити оцінку точності й надійності отриманих наближених моделей. Графічне порівняння модельних і експериментальних даних демонструє ступінь відповідності їх поведінки. Це

важливо для перевірки адекватності моделі та її здатності передбачати системну поведінку за різних умов.

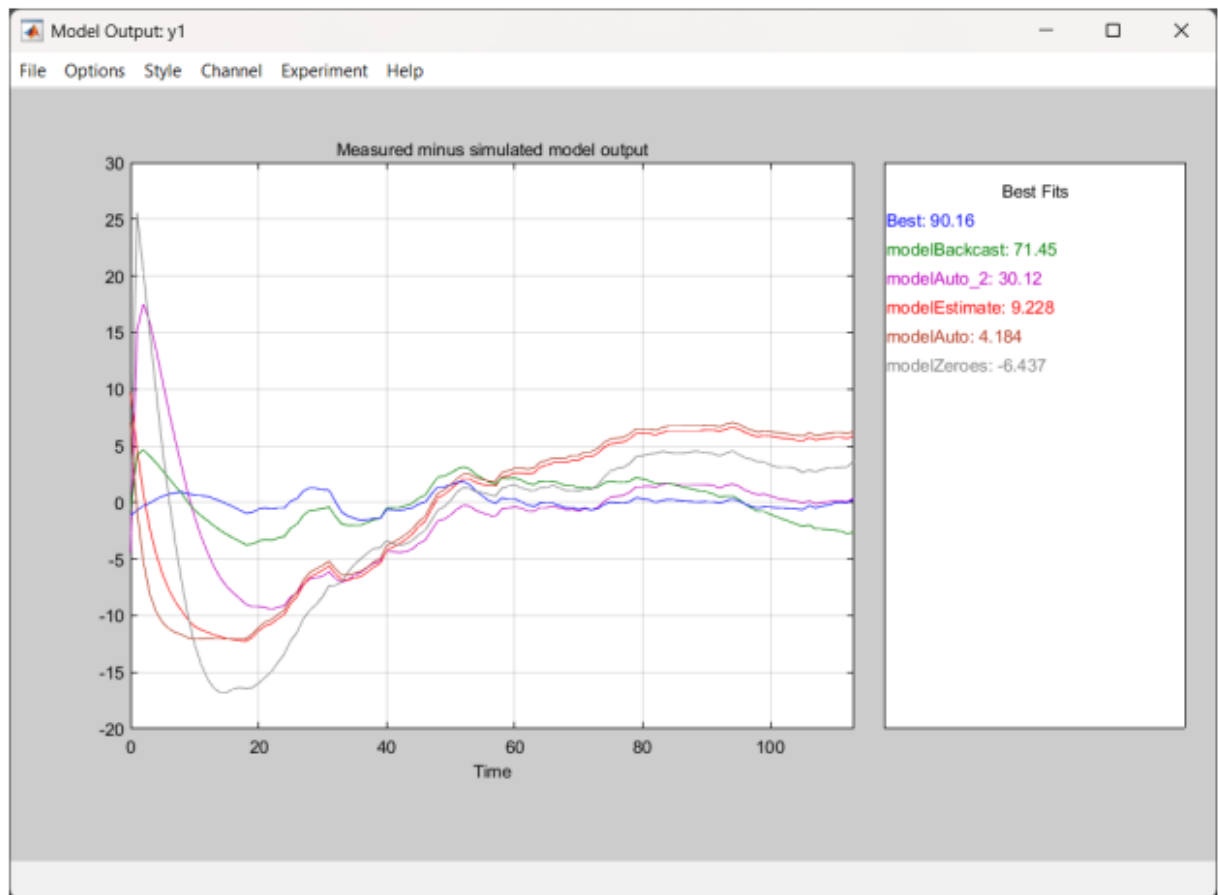


Рис. 2.8 – Графік усталеної помилки передавальних функцій із різними параметрами

У результаті проведених дій була отримана передавальна функція системи автоматичного регулювання (САР) водогрійного котла:

$$W(p) = \frac{0.07144}{p^2 + 0.02872p + 0.001539} \quad (2.1)$$

Ця передавальна функція описує залежність між вхідними та вихідними сигналами системи, яку можна використовувати для подальшого аналізу та керування системою. Крім того, було проведено оцінку якості отриманої моделі. Отримані результати можуть бути використані для визначення оптимальних параметрів керування системою та підвищення її ефективності.

2.2. Структурна схема

Зберемо схему моделювання системи автоматичного регулювання (САР) за допомогою MATLAB і виконаємо моделювання для отримання перехідних характеристик розімкненої САР (рис. 2.9).

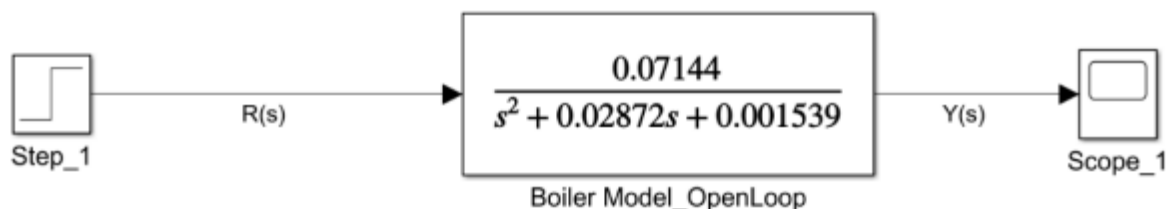


Рис. 2.9 – Структурна схема розімкненої САР

Також побудуємо структурну схему САР водогрійного котла для замкненої системи згідно з рисунком 2.10.

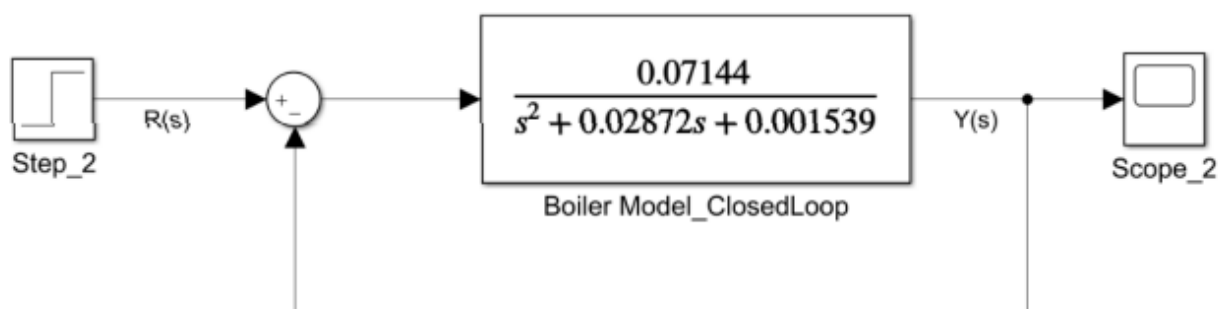


Рис. 2.10 – Структурна схема замкненої САР

Для отримання більш точної та надійної моделі автоматизованої системи керування котельною установкою необхідно провести моделювання у MATLAB. Моделювання виконується для вивчення динаміки системи.

Використовуючи отриману передавальну функцію (2.1), проведемо моделювання з одиничним ступінчастим входним сигналом, щоб отримати перехідні характеристики розімкненої та замкненої системи.

Моделювання з використанням передавальної функції та одиничного ступінчастого сигналу є важливим інструментом для аналізу та оцінки поведінки розімкненої і замкненої систем. Отримані перехідні характеристики та результати

моделювання допоможуть у подальшому налаштуванні й синтезі системи керування, а також в оцінці її ефективності та здатності задовольняти задані вимоги.

Це дозволяє отримати інформацію про час усталення, перерегулювання та тривалість перехідного процесу, що є важливим для оцінки продуктивності системи та її здатності досягати бажаного стану. Також можна оцінити, як система реагує на похибку між бажаним і фактичним станом, а також як контролер впливає на перехідний процес і встановлення системи у заданому стані.

Графік перехідного процесу розімкненої системи керування (рис. 2.11) показує, що після завершення дії перехідного процесу система набуває рівноважного стану.

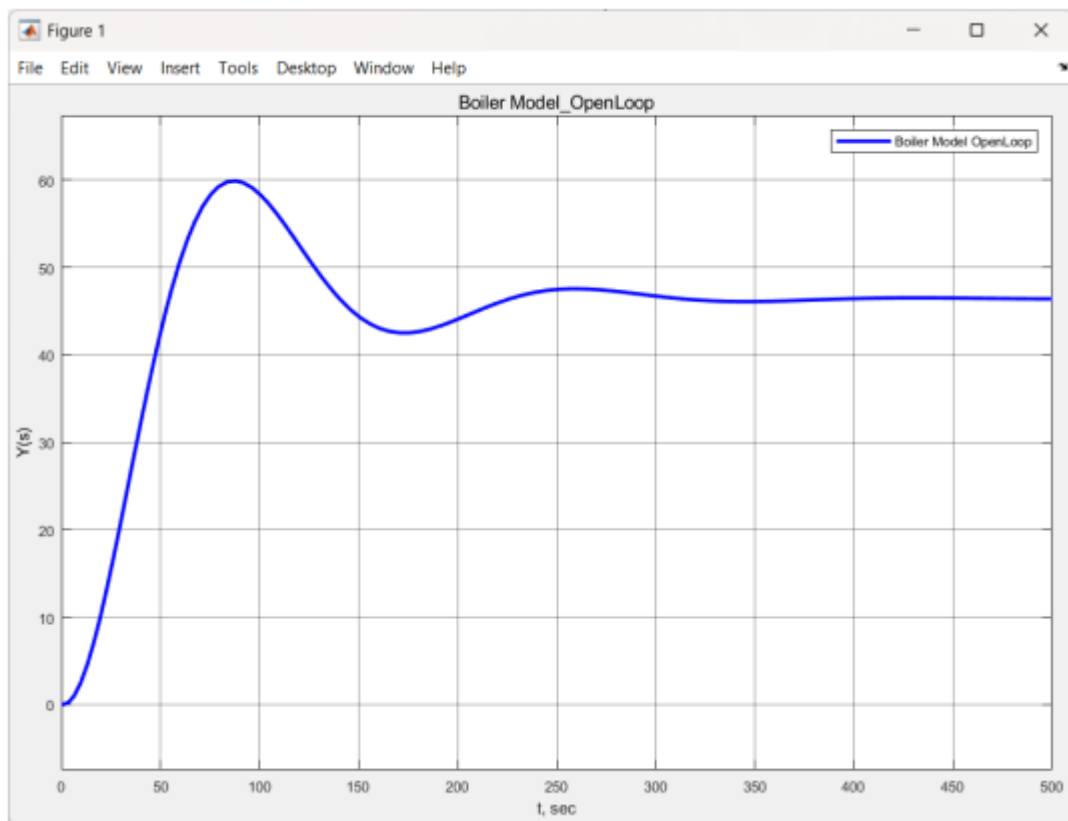


Рис. 2.11 – Результат моделювання розімкненої системи

За графіком вихідного сигналу замкненої системи (рис. 2.12) видно, що на початку процес має коливальний характер, однак з часом система стає збіжною й досягає заданого значення.

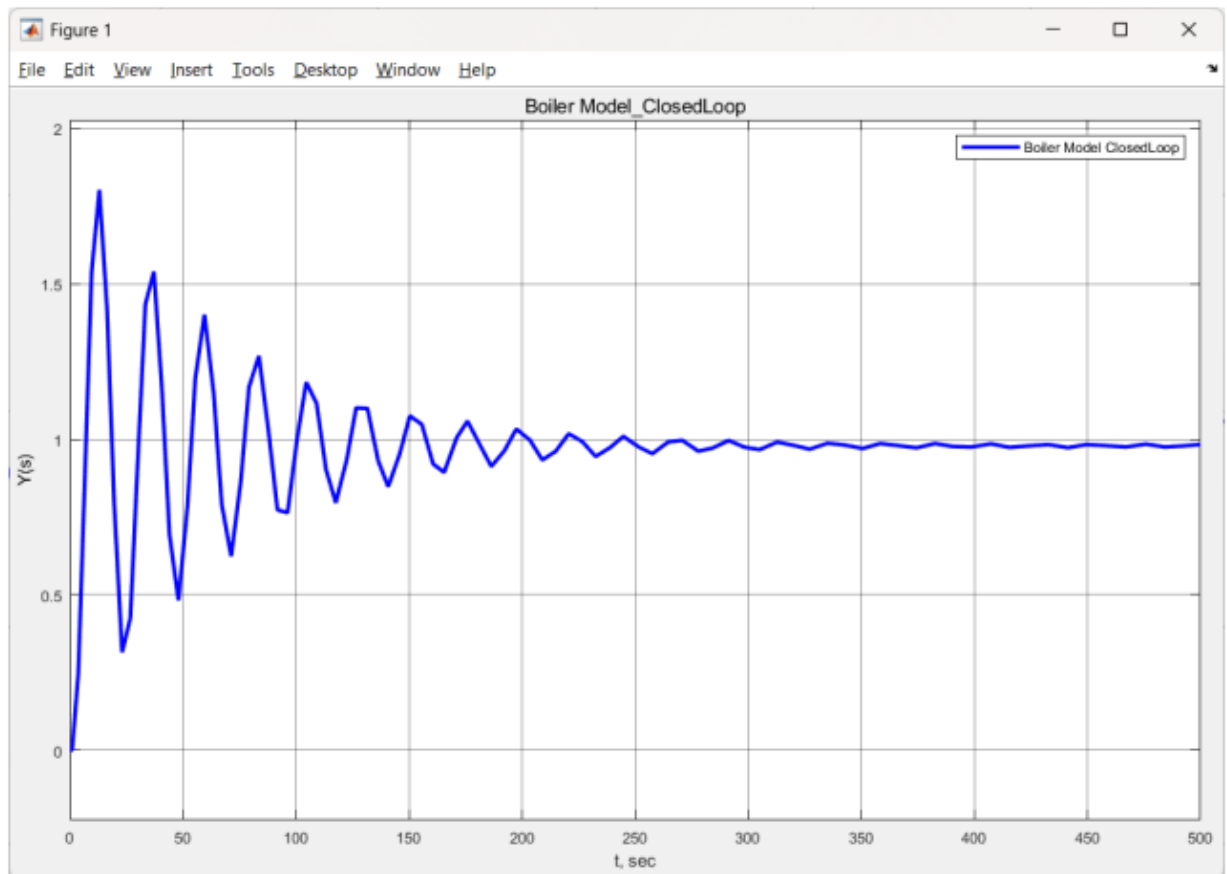


Рис. 2.12 – Результат моделювання замкненої системи

Після виконання моделювання автоматичної системи регулювання газового водогрійного котла були отримані графіки перехідних характеристик розімкненої та замкненої систем. Аналіз отриманих результатів дає змогу оцінити керованість об'єкта керування та зробити висновок, що обрана модель є стійкою. Обидва графіки, які описують поведінку САР, підтверджують цей висновок, що, своєю чергою, гарантує стабільне та ефективне функціонування системи керування газовим водогрійним котлом.

Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено розроблення математичної моделі водогрійного котла, що дало змогу формалізувати теплотехнічні процеси, які відбуваються під час його роботи. Застосування методів структурної та параметричної ідентифікації дозволило отримати адекватну передавальну функцію. Такий підхід забезпечив

можливість точного опису динамічних властивостей котла та визначив основні фактори, які впливають на його поведінку у перехідних режимах.

На основі отриманих математичних залежностей побудовано структурну схему котла та виконано моделювання роботи системи автоматичного керування у середовищі MATLAB/Simulink. Аналіз функціонування розімкненої та замкнутої системи продемонстрував суттєві відмінності у стабільності, точності та швидкодії.

Отримані результати підтвердили коректність побудованої математичної моделі та її придатність для подальших етапів проектування системи керування. Модель відображає реальні фізичні процеси та може бути використана для оптимізації налаштувань регуляторів, вибору алгоритмів керування та проведення імітаційних досліджень у широкому діапазоні режимів.

Таким чином, у межах другого розділу було створено теоретичну основу, що забезпечує можливість подальшої розробки та вдосконалення автоматизованої системи керування водогрійним котлом, а також дозволяє перейти до етапу синтезу регуляторів і вибору оптимальних параметрів керування.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ І СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОТЕЛЬНЕЮ

3.1. Дослідження стійкості першим методом Ляпунова для розімкненої та замкненої систем

Під час аналізу системи автоматичного регулювання водонагрівальної установки важливим аспектом є оцінка стійкості системи та якості процесів керування. Для визначення стійкості застосовуються різні методи, зокрема методи Ляпунова, Гурвіца, Михайлова та Найквіста. Деякі з них передбачають дослідження системи як у часовій, так і у частотній областях.

Одним із найпоширеніших способів дослідження стійкості є перший метод Ляпунова, який базується на аналізі полюсів системи.

Аналіз замкненої та розімкненої систем автоматичного регулювання водогрійного котла показав, що вони мають коливальний характер процесу, який, однак, збігається до усталеної помилки. Це свідчить про те, що обидві системи стійкі, але мають певну похибку. Для більш детальної оцінки стійкості застосуємо перший метод Ляпунова.

Спочатку виділимо характеристичний поліном передавальної функції (2.1) та знайдемо корені відповідного характеристичного рівняння:

$$p^2 + 0.02872p + 0.001539 = 0$$

Розв'язавши це рівняння, отримаємо такі корені:

$$p_1 = -0.00144 + 0.0365i$$

$$p_2 = -0.00144 - 0.0365i$$

Для визначення типу ланки за коренями характеристичного рівняння потрібно проаналізувати їх дійсну та уявну частини.

У даному випадку корені рівняння p_1, p_2 мають дійсну частину -0.0144 та уявні частини $0.0365i$ і $-0.0365i$ відповідно.

Комплексно-спряжені корені, такі як $-0.0144 + 0.0365i$ і $-0.0144 - 0.0365i$ належать системі другого порядку та відповідають коливальній ланці. Такі ланки описують системи, здатні до коливань із певною частотою та амплітудою.

Для визначення стійкості системи за методом Ляпунова потрібно перевірити, щоб усі корені характеристичного рівняння знаходилися в лівій півплощині комплексної площини, що ілюструється на рисунку 3.1.

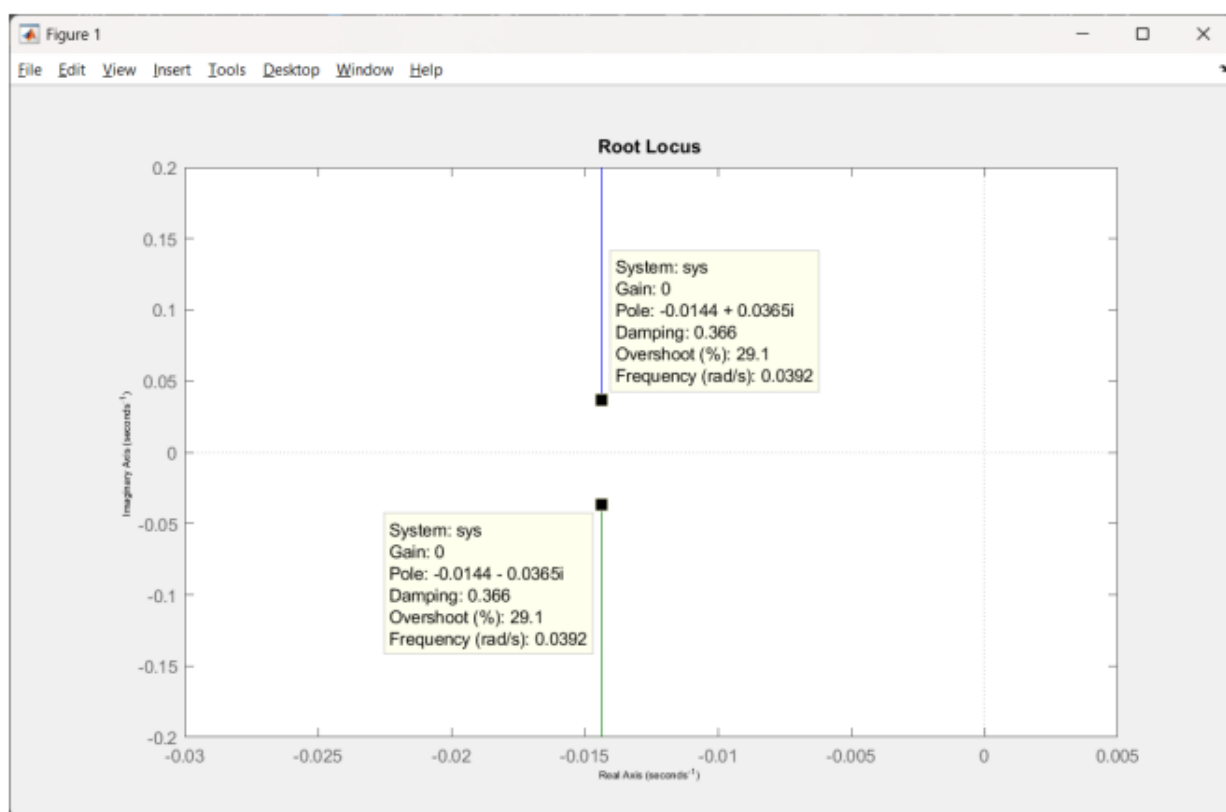


Рис. 3.1 – Графік комплексної площини для розімкненої САР

У цьому випадку всі корені мають від’ємні дійсні частини, отже, вони розташовані в лівій півплощині комплексної площини, а система є стійкою за першим методом Ляпунова.

Той самий підхід застосуємо для дослідження стійкості замкненої системи. Отримаємо характеристичне рівняння (3.2), що відповідає замкненій САР, використовуючи передавальну функцію (1.1):

$$p^2 + 0.02872p + 0.001539 = 0$$

Відповідно, коренями цього рівняння є:

$$p_1 = -0.00144 + 0.2698i$$

$$p_2 = -0.00144 - 0.2698i$$

Для досліджуваної системи з коренями $-0.0144 + 0.2698i$ та $-0.0144 - 0.2698i$ визначимо їх розташування на комплексній площині.

Оскільки корені є комплексно-спряженими, вони лежать на одній прямій, перпендикулярній уявній осі комплексної площини, та є симетричними відносно цієї осі.

У даному випадку дійсна частина коренів є від'ємною (рис. 3.2), отже, система є стійкою.

Таким чином, замкнена система, що задається передавальною функцією (1.1), є стійкою за першим методом Ляпунова.

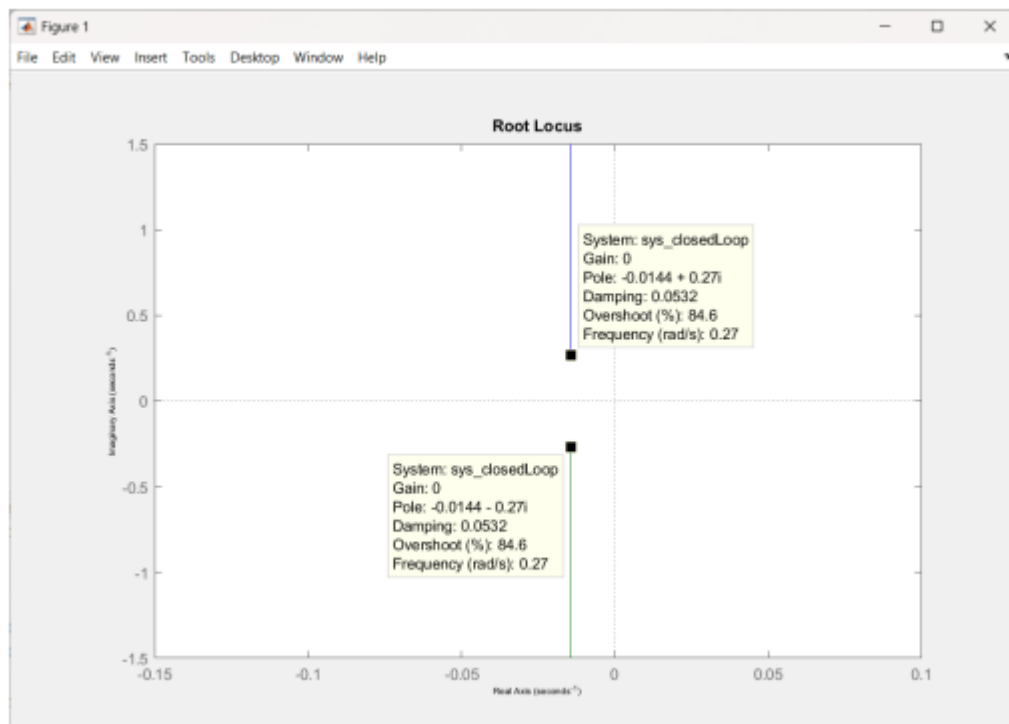


Рис. 3.2 – Графік комплексної площини для замкненої САР

3.2. Оцінки прямих і непрямих показників якості системи керування

Прямі та непрямі оцінки якості системи керування застосовуються для визначення того, наскільки ефективно система виконує свої функції.

Прямі оцінки пов'язані з вимірюванням основних параметрів, таких як точність відстеження завдання, швидкість реакції на збурення, величина перерегулювання, час усталення тощо.

Непрямі оцінки, своєю чергою, використовуються для визначення якості системи на основі інших характеристик, наприклад:

- стійкість системи;
- смуга пропускання;
- швидкість наростання перехідного процесу;
- резерви стійкості (за фазою та амплітудою).

Для отримання даних критеріїв було використано дані замкненої системи автоматичного регулювання (САР), зображені на рисунку 3.3.

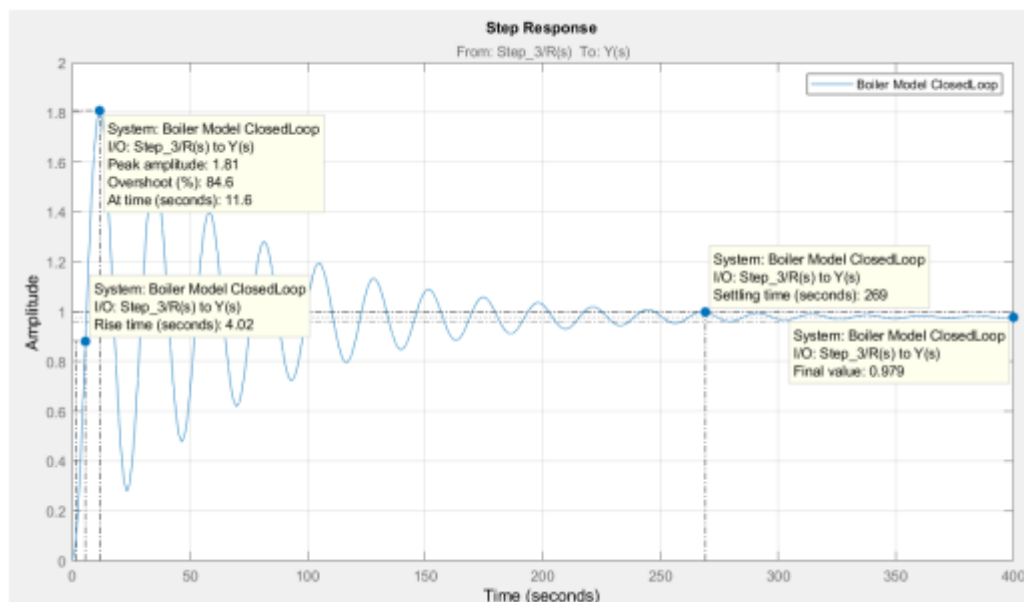


Рис. 3.3 – Графік перехідного процесу замкненої системи з прямими оцінками якості

Для отримання прямих оцінок якості використано інструмент MATLAB Linear System Analyzer Toolbox.

Linear System Analyzer Toolbox у середовищі MATLAB надає можливості для аналізу та візуалізації систем керування. За його допомогою можна досліджувати різноманітні параметри та метрики системи, зокрема:

- стійкість;

- перехідні характеристики;
- частотні характеристики;
- імпульсну та амплітудно-фазову реакції;
- логарифмічні амплітудно-частотні характеристики (ЛАЧХ).

За допомогою цього інструмента можливо імпортувати передавальну функцію, отриману в результаті ідентифікації системи керування, після чого провести аналіз і оцінку якості з використанням наявних функцій MATLAB.

Нижче, у таблиці 3.1, наведено результати оцінок якості системи автоматичного регулювання (САР) водогрійного котла.

Таблиця 3.1

Результати оцінок якості САР водогрійного котла

№	Показник	Позначення	Значення
1	Час регулювання, с	$T_{рег}$	269
2	Перерегулювання, %	Δ	81
3	Кількість коливань	M	11
4	Коливальність, %	μ	70,4
5	Період коливань, сек	$T_{кол}$	23,3
6	Частота коливань, рад/с	$\omega_{кол}$	0,27
7	Усталена похибка	e_{ss}	0,0168
8	Час досягнення першого максимуму	T_p	11,6
9	Час наростання	T_R	6,02
10	Декремент затухання	λ	1,4

Далі виконаємо розрахунок усіх оцінок якості САР та запишемо результати обчислень у таблицю 3.2.

Час регулювання. Може бути визначений як час, за який вихідний сигнал системи, починаючи з моменту збурення, наближається до свого усталеного значення з похибкою, що не перевищує задану точність. Він характеризує швидкість встановлення системи та може бути визначений експериментально або

за допомогою математичної моделі системи. Це значення знайдено за графіком перехідного процесу й дорівнює ($T_{рег} = 269\text{с}$).

Перерегулювання. Вимірюється у відсотках і визначається як відношення максимального відхилення вихідного сигналу системи від її усталеного значення до самого усталеного значення. Іншими словами, перерегулювання показує, наскільки система “перереагує” на вхідний сигнал.

Кількість коливань. Характеризує кількість коливань, що відбуваються після досягнення усталеного режиму роботи. Для визначення кількості коливань можна скористатися графічним методом підрахунку коливань перехідного процесу, а також існує аналітичний метод обчислення кількості коливань за формулою:

$$M = \frac{T_{рег}}{T_{кол}} \quad (3.3)$$

де $T_{кол}$ — період коливань, с.

Він визначається за графіком перехідного процесу і вимірюється як відстань між сусідніми вершинами коливання. Тоді кількість коливань дорівнює:

$$M = \frac{T_{рег}}{34,9 - 11,6} = \frac{269}{23,3} = 11,3$$

Таким чином, ми визначили, що кількість коливань (M) дорівнює 11.

Колівальність.

Використовується для оцінки стійкості системи й є небажаною властивістю. Чим вища колівальність, тим менш стійкою є система. Для розрахунку колівальності системи необхідно встановити значення першого та другого піків коливань і підставити їх у формулу:

$$\mu = \frac{|y_{max2} - 1|}{|y_{max1} - 1|} * 100\% \quad (3.4)$$

де y_{max1} — значення першого максимуму; y_{max2} — значення другого максимуму.

Тоді колівальність дорівнює:

$$\mu = \frac{|y_{max2} - 1|}{|y_{max1} - 1|} * 100\% = \frac{1.57 - 1}{1.81 - 1} * 100\% = 70.4\%$$

Частота коливань. Цей критерій визначається як частота, на якій амплітуда вихідного сигналу системи зменшується до рівня, що відповідає амплітуді вихідного сигналу в усталеному режимі. Визначається за формулою:

$$\omega_{\text{КОЛ}} = \frac{2\pi}{T_{\text{КОЛ}}} \quad (2.5)$$

де $T_{\text{КОЛ}}$ — період коливань, с.

Тоді частота коливань дорівнює:

$$\omega_{\text{КОЛ}} = \frac{2\pi}{T_{\text{КОЛ}}} = \frac{1}{23.3} = 0.27$$

Усталена похибка. Усталена похибка (*Steady-State Error*) — це похибка, яка виникає в стаціонарному режимі роботи системи, коли вхідні сигнали стабілізувалися, а вихідні сигнали досягли постійного рівня. Вона є різницею між заданим значенням і фактичним значенням на виході системи в усталеному режимі.

Формально усталена похибка визначається як межа відхилення вихідного сигналу від заданого значення при t прямує до нескінченності). Іншими словами, це похибка, яка залишається після того, як вихід системи досяг стабільного стану у відповідь на вхідний сигнал.

Зберемо схему для моделювання замкненої системи (Рис. 3.4).

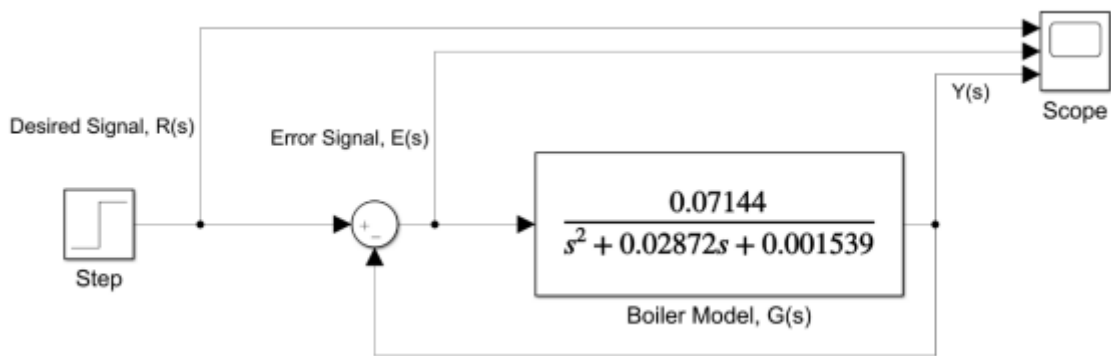


Рис. 3.4 – Моделювання замкнутої САР

Після моделювання даної замкненої САР водогрійного котла отримуємо графік зміни помилки в часі, що відповідає рисунку 3.5.

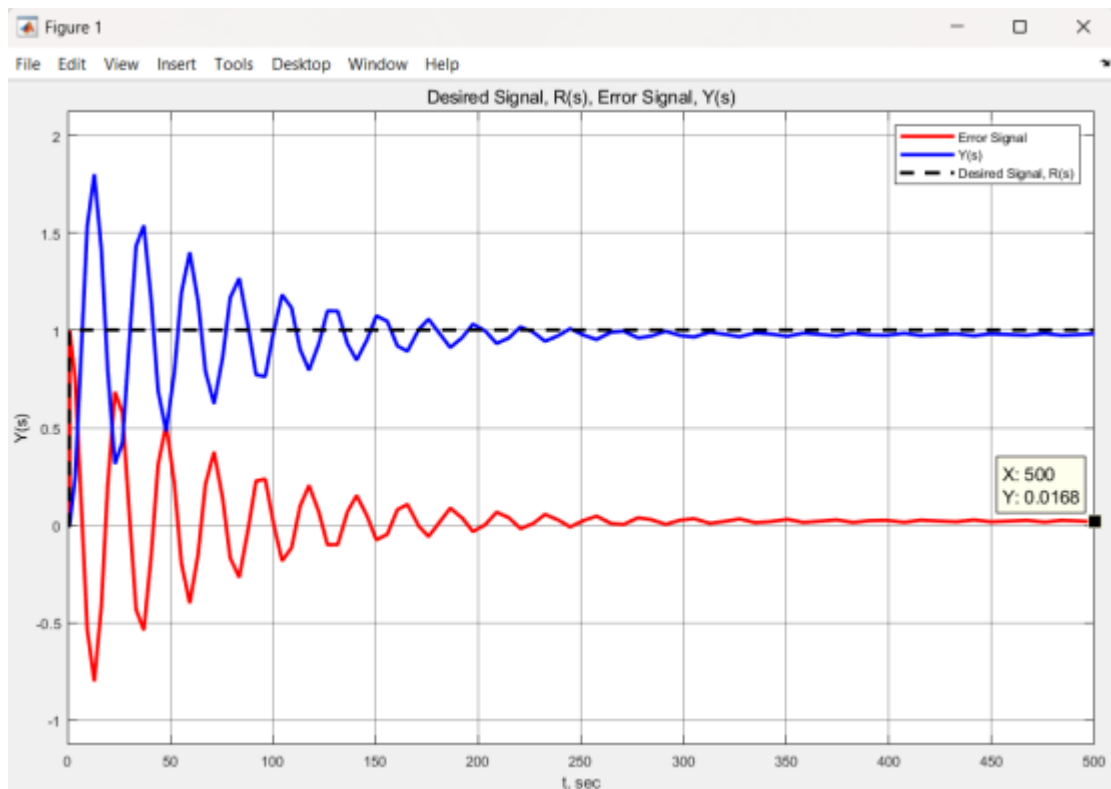


Рис. 3.5 – Графік результату моделювання перехідного процесу та усталеної похибки

Час досягнення першого максимуму. Цей критерій належить до показників динаміки системи керування. Він характеризує час, необхідний системі для досягнення першого максимуму вихідного сигналу після подання на вхід одиничного ступінчастого сигналу.

Чим менший час досягнення першого максимуму, тим швидше система реагує на зміну вхідного сигналу, а отже, тим вищі її динамічні характеристики. Визначається графічно.

Час наростання. Використовується для оцінки швидкості зростання вихідного сигналу системи від моменту подання вхідного сигналу до моменту досягнення усталеного значення. Він визначається як час, за який вихідний сигнал уперше досягає 90% від свого усталеного значення після подання ступінчастого сигналу на вхід.

Критерій часу наростання дозволяє оцінити швидкодію системи, тобто швидкість її реакції на зміни вхідного сигналу. Чим менше час наростання, тим

швидше система реагує. Однак занадто малий час наростання може призвести до перерегулювання та появи коливань вихідного сигналу.

Декремент затухання. Чим більший декремент затухання, тим швидше згасають коливання в системі, і тим стійкішою вона є. Проте занадто велике значення декременту може призвести до того, що система не зможе колитися у потрібному діапазоні, що також є небажаним.

Він обчислюється за формулою:

$$\lambda = \frac{|y_{max1} - y_{ss}|}{|y_{max2} - y_{ss}|} \quad (3.6)$$

Де y_{max1} — значення першого максимуму; y_{max2} — значення другого максимуму; y_{ss} — усталене значення.

Тоді декремент затухання дорівнює:

$$\lambda = \frac{|y_{max1} - y_{ss}|}{|y_{max2} - y_{ss}|} = \frac{|1.81 - 0.979|}{|1.57 - 0.979|} = \frac{0.831}{0.591} = 1.40$$

На графіку, що відповідає рисунку 2.6, відображені основні прямі оцінки якості.

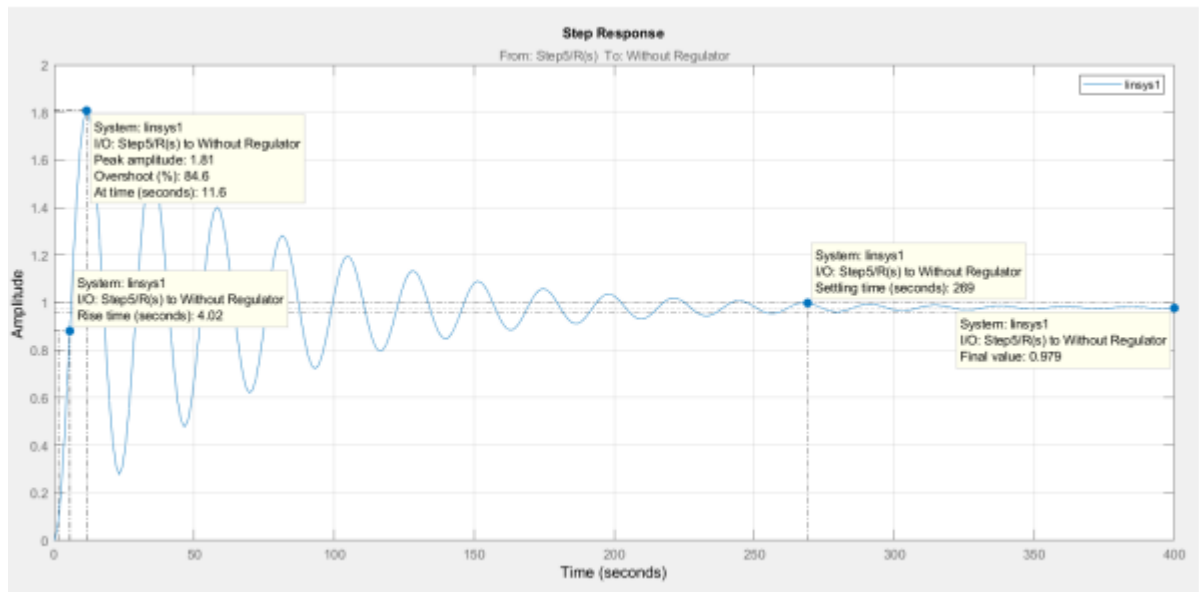


Рис. 2.6 – Графік перехідного процесу з відображенням прямих оцінок якості замкненої системи

Для підтвердження даних, отриманих за допомогою прямих оцінок якості САР, можна використати опосередковані оцінки якості. Вони дозволяють оцінити

характеристики системи керування без прямого вимірювання таких величин, як час регулювання чи перерегулювання.

Опосередковані оцінки якості САР можуть бути отримані шляхом аналізу перехідних процесів або частотних характеристик системи. Наприклад, можна проаналізувати АЧХ (амплітудно-частотну характеристику) та ФЧХ (фазово-частотну характеристику) системи, і визначити за ними параметри, такі як смуга пропускання та фазовий запас. Ці параметри, у свою чергу, можуть бути використані для оцінки якості системи.

Скористаємося кореневим методом оцінки замкненої САР. Для проведення аналізу за допомогою корневих оцінок якості необхідно побудувати кореневий графік — графік на комплексній площині, на якому показано положення коренів характеристичного рівняння при зміні коефіцієнтів передавальної функції (Рис. 3.7).

Аналізуючи зміну положення коренів при варіюванні коефіцієнтів, можна визначити, які параметри забезпечують потрібні якості системи.

Кореневі оцінки якості можуть бути корисними як для аналітичного дослідження системи, так і для її проектування та оптимізації.

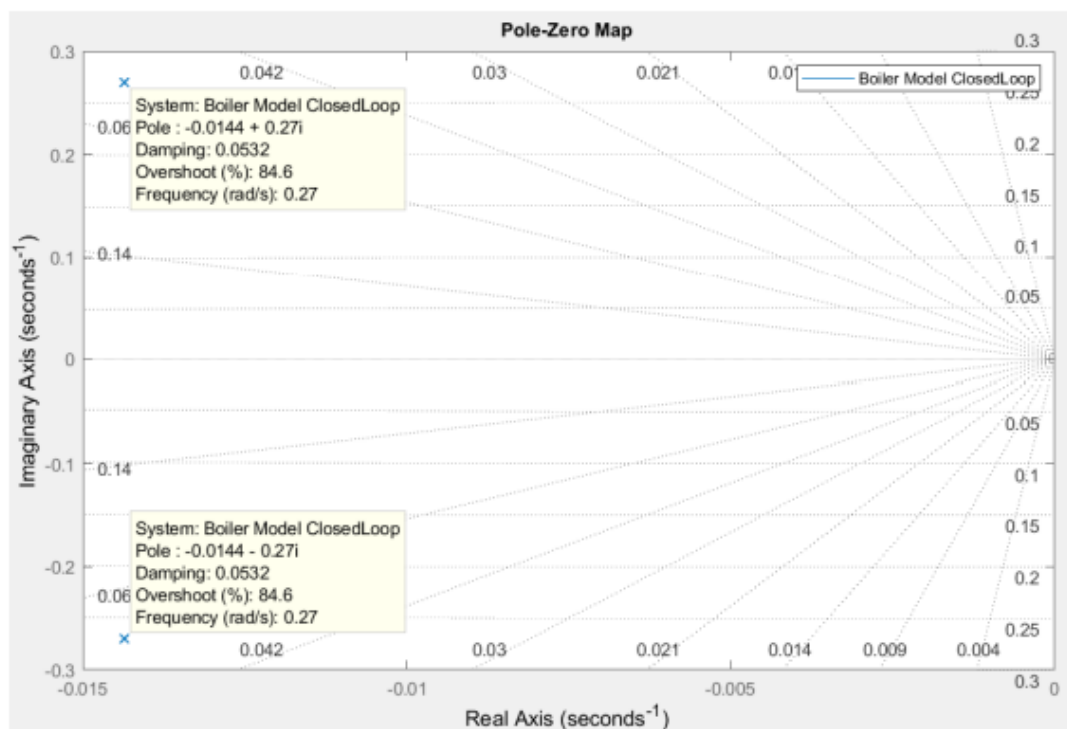


Рис. 3.7 – Графік комплексної площини замкненої САР

Кореневі оцінки якості (Root Locus) дозволяють оцінити, як зміна параметрів системи впливає на корені характеристичного рівняння і, відповідно, на її стійкість та динаміку.

Проведемо розрахунок таких характеристик:

Час регулювання визначається за формулою

$$T_{\text{рег}} = \frac{4}{|\sigma|} \quad (3.7)$$

Де σ — міра швидкодії системи.

Тоді, згідно з формулою (3.7), час регулювання дорівнює:

$$T_{\text{рег}} = \frac{4}{|\sigma|} = \frac{4}{0.0144} = 277$$

Перерегулювання визначається за формулою:

$$\Delta = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} * 100\% \quad (3.8)$$

де ζ — коефіцієнт демпфування.

Підставимо значення коефіцієнта демпфування з графіка комплексної площини у формулу (3.8):

$$\Delta = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} * 100\% = e^{\frac{-0.0532\pi}{\sqrt{1-0.0532^2}}} = e^{\frac{-0.167}{0.999}} * 100\% = 84.62$$

Максимальне значення вихідного сигналу можна визначити за формулою:

$$y_{\text{max}} = y_{\text{ss}} \left(1 + \frac{P_{\text{пер}}}{100}\right) \quad (3.9)$$

Підставимо значення у формулу (2.9):

$$y_{\text{max}} = y_{\text{ss}} \left(1 + \frac{P_{\text{пер}}}{100}\right) = 0.979 \left(1 + \frac{84.62}{100}\right) = 0.979 * 1.85 = 1.81$$

Частота коливань обчислюється за формулою:

$$\omega_{\text{кол}} = \omega_d \sqrt{1 - \xi^2} \quad (3.10)$$

Тоді:

$$\omega_{\text{кол}} = \omega_d \sqrt{1 - \xi^2} = 0.27 * 0.998 = 0.27$$

За формулою (3.11) можна визначити час досягнення максимальної амплітуди:

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_d \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (3.11)$$

Тоді:

$$p = \frac{\pi}{\omega_d \sqrt{1 - \xi^2}} = \frac{\pi}{0.27} = 11.6$$

Ступінь стійкості:

$$\eta = |\sigma_{min}| = 0.0144$$

Варто зазначити, що на основі кореневих оцінок якості також можна зробити висновки про характеристики системи керування.

У даному випадку ключові кореневі оцінки якості відповідають прямим оцінкам, що підтверджує правильність використаних методів і підвищує довіру до отриманих результатів.

Отримані дані прямих і опосередкованих оцінок зведемо у таблицю 3.2 та проведемо аналіз критеріїв, порівнявши їх із нормативними значеннями систем автоматичного регулювання.

Таблиця 3.2

Оцінки якості САР котла без регулятора

ОСНОВНІ	№	Показник	Позначення	Пряма оцінка	Непряма оцінка	Норма	Результат
	1	Час регулювання, с	$T_{рег}$	269	277		
	2	Перерегулювання, %	Δ	81	84,62	10 – 30%	×
	3	Кількість коливань	M	11		1 – 2	×
	4	Коливальність, %	μ	70,4			
	5	Період коливань, сек	$T_{кол}$	23,3			
	6	Частота коливань, рад/с	$\omega_{кол}$	0,27	0,27		
	7	Усталена похибка	e_{ss}	0,0168		0	×

Продовження таблиці 3.2

	№	Показник	Позначення	Пряма оцінка	Непряма оцінка	Норма	Результат
непрямі	8	Час досягнення першого максимуму	T_p	11,6	11,6		
	9	Час наростання	T_R	6,02			
	10	Декремент затухання	λ	1,4			
	11	Степінь стійкості	η	0,0144			

З таблиці можна зробити такі висновки:

- Час регулювання перевищує нормативні вимоги, отже, необхідно зменшити його значення.
- Перерегулювання також перевищує норму, що свідчить про потребу зниження амплітуди коливань у перехідному процесі.
- Кількість коливань перевищує допустиме значення, що може вказувати на тенденцію до нестабільності системи.
- Усталена помилка більша за норму, отже, потрібно зменшити похибку в усталеному режимі.

Таким чином, необхідно скоригувати параметри системи, зокрема зменшити час регулювання, перерегулювання та усталену помилку, а також контролювати кількість коливань, щоб забезпечити стійкість і надійність роботи системи.

Метою подальших досліджень є розроблення оптимального регулятора для покращення показників системи автоматичного керування водогрійного котла.

3.3. Синтез системи керування на основі методів ZN1 та генетичного алгоритму

Після аналізу параметрів системи автоматичного керування (САК) водогрійного котла зроблено висновок, що найкращим типом регулятора для цієї системи є PID-регулятор.

Вибір PID-регулятора обґрунтований його здатністю забезпечувати швидке та точне регулювання системи керування за наявності шумів і збурень. Аналіз критеріїв якості САК, наведений у таблиці 3.2, показує, що система має проблеми з перерегулюванням, коливальністю та усталеною похибкою. Пропорційна складова PID-регулятора може допомогти зменшити перерегулювання та усталену похибку, а інтегральна складова – компенсувати систематичні помилки та усунути усталену похибку. Однак використання інтегральної складової сприяє збільшенню коливань системи, які вже присутні. Для цього застосовується диференційна складова, яка сприяє зменшенню коливань системи.

Таким чином, PID-регулятор є оптимальним вибором для цієї САК, оскільки його елементи дозволяють усунути основні проблеми, виявлені під час аналізу критеріїв якості. Проте, з метою пошуку оптимального рішення також проведено дослідження для P- та PI-регуляторів.

Закон PID-регулятора задається формулою:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt - k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.12)$$

Де $e(t)$ – похибка регулювання; k_p, k_i, k_d – коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференційної складових відповідно.

Пропорційна складова відповідає за реакцію регулятора на поточну похибку, інтегральна – за корекцію системи з урахуванням попередніх похибок, а диференційна – за реакцію на швидкість зміни похибки. Взаємодія цих трьох складових забезпечує швидку та точну стабілізацію системи.

Постановка задачі синтезу емпіричного регулятора. Для заданої передавальної функції (1.1), що описує об'єкт керування (розімкнену модель), виконаємо налаштування типових регуляторів за методом Циглера–Ніколса №1 (ZN1). Оскільки передатна функція має другий порядок, цей метод дозволяє визначити найбільш оптимальні параметри PID-регулятора. Також буде виконано розрахунок і моделювання інших типових регуляторів.

Метод налаштування за Циглером–Ніколсом полягає у спостереженні реакції системи на вхідний сигнал. Результат будується у вигляді кривої реакції та аналізується для визначення двох ключових параметрів: L — часу запізнення та T — сталої часу. Ці значення отримують шляхом проведення дотичної до кривої реакції, як показано на рисунку 3.8.

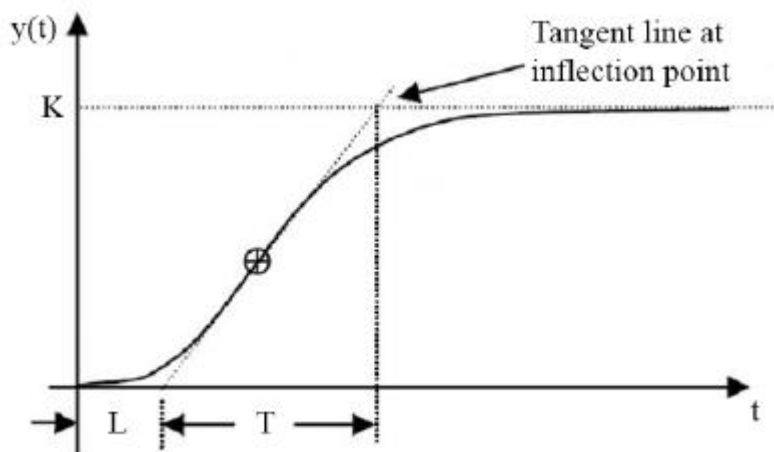


Рис. 3.8 – Приклад методу Циглера–Ніколса

Для отримання результатів у вигляді коефіцієнтів k_p, k_i, k_d для MATLAB була написана програма, що визначає значення T – сталої часу та L – часу запізнення, використовуючи перехідний процес передатної функції. Нижче коротко описано принцип роботи програми.

На основі усталеного значення амплітуди вихідного сигналу K визначаються коефіцієнти T і L методом знаходження порогового критерію амплітуди, де для даного випадку критерії становлять: $T = 1 - e^{-1}$, $L = 0.05$. Це приблизно відповідає інтервалу вихідного сигналу, коли він досягає 5 та 63 відсотків від усієї амплітуди перехідного процесу відповідно. Зазначені критерії передаються у функцію `find`, яка дозволяє визначити індекс значень цих критеріїв на графіку.

Далі необхідно обчислити нахил дотичної до перехідної характеристики. Щоб знайти нахил дотичної лінії в заданій точці кривої, потрібно взяти похідну функції в цій точці. Похідна визначає швидкість зміни функції в певній точці, тобто її нахил. Цією точкою є точка перегину.

Щоб знайти точку перегину графіка функції, необхідно знайти другу похідну цієї функції та прирівняти її до нуля. Точка, у якій друга похідна змінює знак, і буде точкою перегину.

Отриману точку перегину підставляють у похідну функції та визначають значення точок T і L .

Далі отримані дані підставляються відповідно до таблиці 3.3 для обчислення значень коефіцієнтів типових регуляторів.

Таблиця 3.3

Обчислення параметрів PID-регулятора

	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{KL}$	0	0
PI	$0.91 \frac{T}{KL}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{KL}$	$2L$	$0.5L$

Результатом роботи програми є виведення в консоль значень сталої часу та часу запізнення (Рис. 3.9), а також розраховані коефіцієнти типових регуляторів разом із графіком розташування точок (T) і (L) (Рис. 3.10).

```

Command Window

L =

    9.6208

T =

    38.4833

P_Controller =

    0.0866    0    0

PI_Controller =

    0.0780    0.0315    0

|
PID_Controller =

    0.1039    0.0520    4.8104

fx >> |

```

Рис. 3.9 – Результат роботи програми

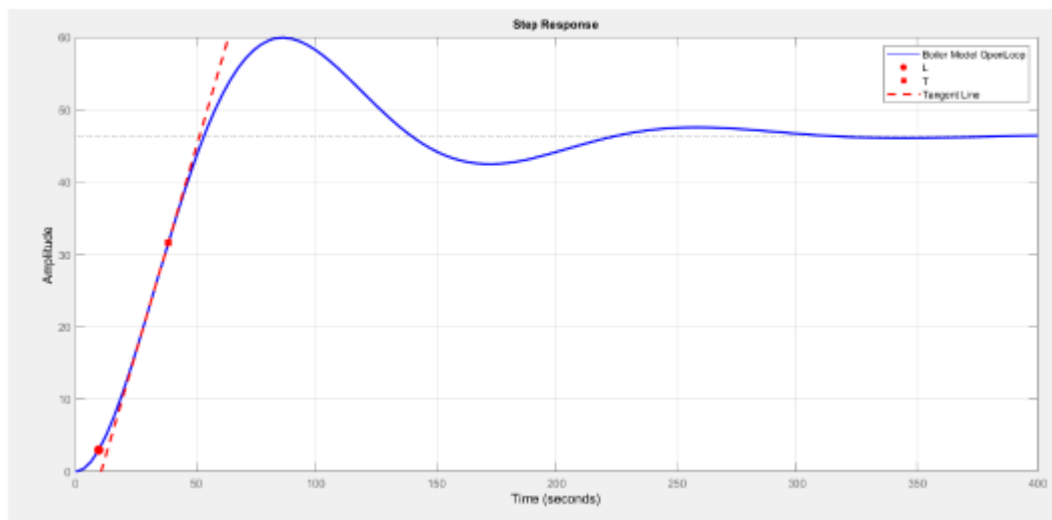


Рис. 3.10 – Результат роботи програми

Далі зберемо схему для перевірки отриманих значень параметрів регулятора (рис. 3.11).

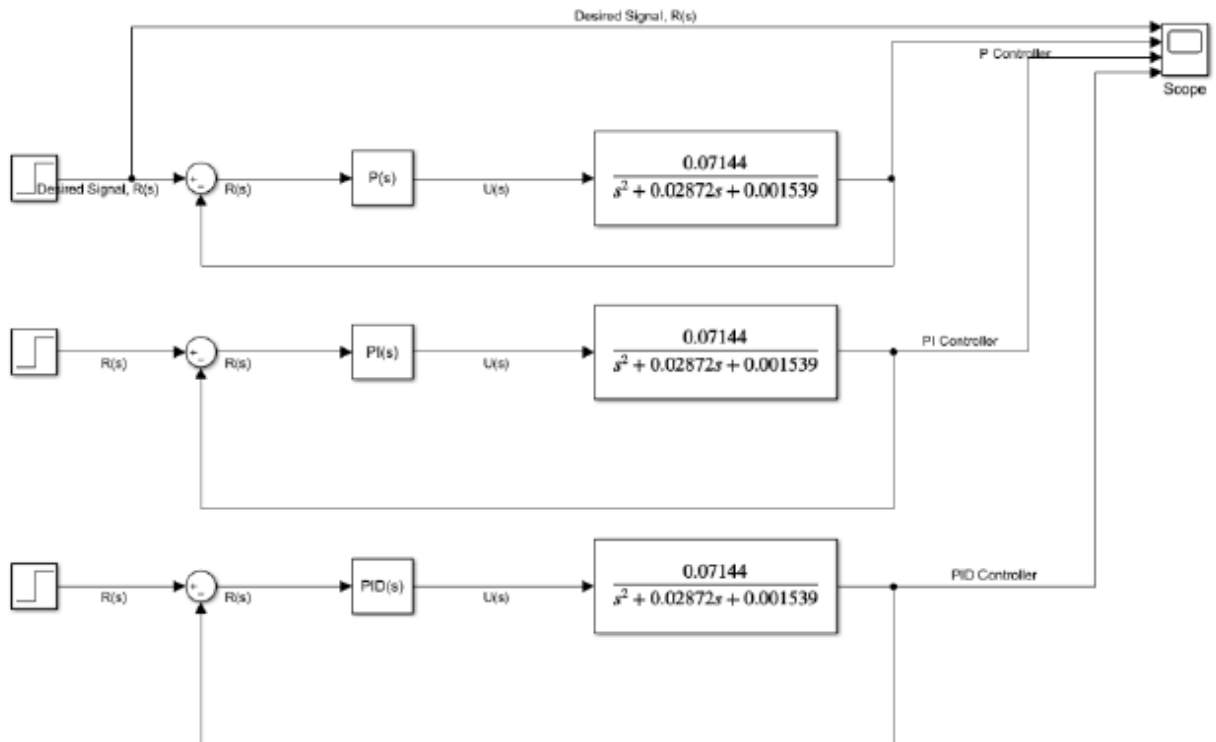


Рис. 3.11 – Структурна схема моделювання методу ZN1

Отримаємо результати моделювання з отриманими параметрами регуляторів при використанні методу ZN1 (рис. 3.12).

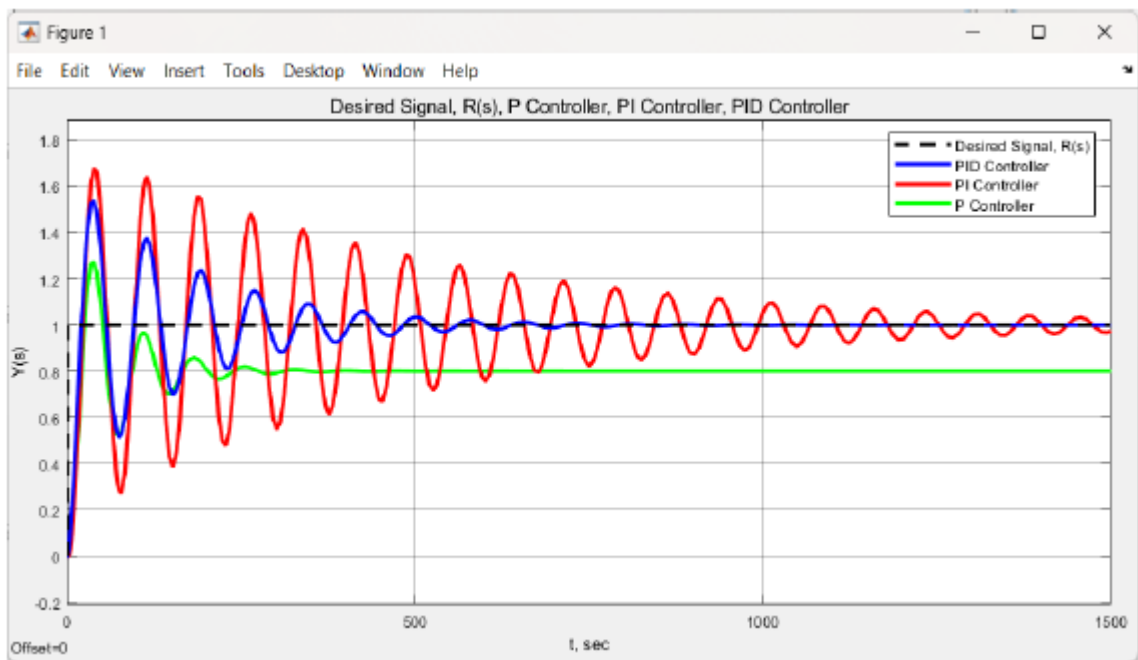


Рис. 3.12 – Результати моделювання ZN1

Згідно з графіками перехідного процесу, можна зробити висновок, що PI-регулятор не забезпечує необхідної точності системи та вводить її в коливання з постійною амплітудою. P-регулятор дозволяє досягти більш наближеного до заданого значення, однак не підходить, оскільки сигнал не досягає потрібного рівня. Натомість PID-регулятор забезпечує необхідну точність і стабільність перехідного процесу.

Проведемо аналіз показників якості для цього регулятора (Рис. 3.13).

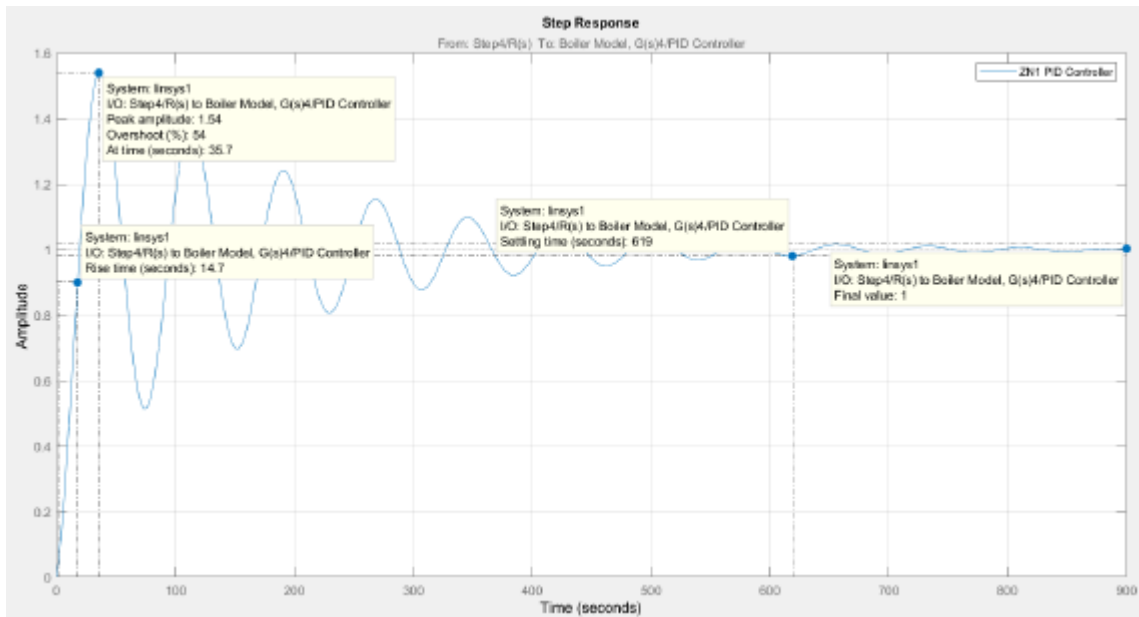


Рис. 3.13 – Результати моделювання PID-регулятора ZN1 з оцінкою якості системи регулювання

З урахуванням цих результатів і проведеної оцінки якості системи після синтезу PID-регулятора методом Циглера–Ніколса №1 можна зробити висновок, що система стала точнішою й стійкішою.

Перерегулювання зменшилося до 54%, що, однак, все ще перевищує допустимі межі. Час наростання покращився й склав 14,7 секунди, що свідчить про швидшу реакцію системи на зміну вхідного сигналу. Час регулювання зріс до 619 секунд, що може свідчити про потребу в подальшій оптимізації. Усталена похибка дорівнює нулю, що свідчить про високу точність регулювання.

Отже, можна зробити висновок, що додавання PID-регулятора та налаштування його параметрів методом Циглера–Ніколса №1 привели до

покращення якості системи й точнішого регулювання, однак ще не задовольняють мінімальні вимоги до коливальності.

Постановка задачі синтезу оптимального регулятора

Для заданої передатної функції (1.1) визначимо оптимальні параметри регулятора із використанням генетичного алгоритму [4].

Генетичний алгоритм є методом оптимізації, заснованим на принципах природного добору та еволюції. Він дозволяє знайти оптимальне рішення задачі оптимізації за допомогою операцій схрещування, мутації та відбору, базуючись на оцінці пристосованості.

У контексті оптимізації параметрів регулятора, генетичний алгоритм може бути використаний для пошуку оптимальних значень коефіцієнтів пропорційності, інтегрування та диференціювання в PID-регуляторі. Оптимізована функція виступає цільовою функцією, що оцінює якість роботи системи при різних наборах параметрів регулятора.

Насамперед, для оптимізації системи керування за допомогою генетичного алгоритму необхідно визначити цільову функцію, яка відображає, наскільки добре система виконує свою задачу. Формулюються правила вибору коефіцієнтів підсилення PID-регулятора відповідно до бажаних характеристик — таких як швидкість реакції та зменшення перерегулювання.

У цьому проєкті використовується генетичний алгоритм для ефективного підбору коефіцієнтів підсилення PID-регулятора з метою мінімізації цільової функції ІТАЕ.

Функція ІТАЕ (Integral of Time multiplied by the Absolute value of Error) — це одна з найпоширеніших цільових функцій, що застосовується для оптимізації параметрів регулятора [4]. Вона визначається як інтеграл від добутку абсолютного значення похибки на час, від початку процесу керування до моменту, коли система досягає сталого стану.

Таким чином, ІТАЕ враховує не лише величину похибки, а й тривалість її існування у процесі регулювання.

Рівняння функції ІТАЕ визначається як інтеграл від добутку абсолютної похибки на час:

$$J = \int_0^{\infty} (|e| * t) * dt$$

де e – похибка керування; t – момент часу.

Використання цієї функції дає змогу оцінити загальну якість керування системою на всьому часовому інтервалі, враховуючи як швидкість усунення похибки, так і її амплітуду. Чим менше значення функціоналу ІТАЕ, тим вищою є якість керування системою.

Вона має низку переваг порівняно з іншими функціями, такими як MSE (Mean Squared Error) або MAE (Mean Absolute Error), зокрема — більшу чутливість до швидкодії системи та точніше відображення ефективності керування в реальному часі. Однак використання функції ІТАЕ може також призводити до певних недоліків, наприклад, до підвищення чутливості системи до викидів. Це не стало винятком і в нашому випадку, коли функція ІТАЕ застосовувалася як основна цільова функція.

Процес визначення параметрів PID-регулятора за допомогою генетичного алгоритму з цільовою функцією ІТАЕ включає такі етапи:

1. Визначення геному – вибір і кодування параметрів PID-регулятора K_p, K_i, K_d як генів у генетичній популяції;
2. Ініціалізація початкової популяції – створення випадкової генетичної популяції із заданою кількістю особин;
3. Оцінка пристосованості – визначення рівня пристосованості кожної особини популяції шляхом обчислення значення ІТАЕ для кожної з них;
4. Селекція – відбір найбільш пристосованих особин із поточної популяції для формування наступного покоління;
5. Розмноження – схрещування та створення нових особин із батьківських, використовуючи оператори схрещування (наприклад, одноточкове, двоточкове або рівномірне);

6. Мутація – випадкова зміна деяких генів у новостворених особинах із невеликою ймовірністю для забезпечення різноманітності популяції;
7. Формування нової популяції – об'єднання найкращих особин, нових і мутованих екземплярів у нове покоління;
8. Оцінка критеріїв зупинки – перевірка умов зупинки (наприклад, досягнення максимальної кількості поколінь або мінімального значення цільової функції);
9. Повернення до кроку 3 до виконання критеріїв зупинки.

Ці кроки проілюстровано на рисунку 3.14.

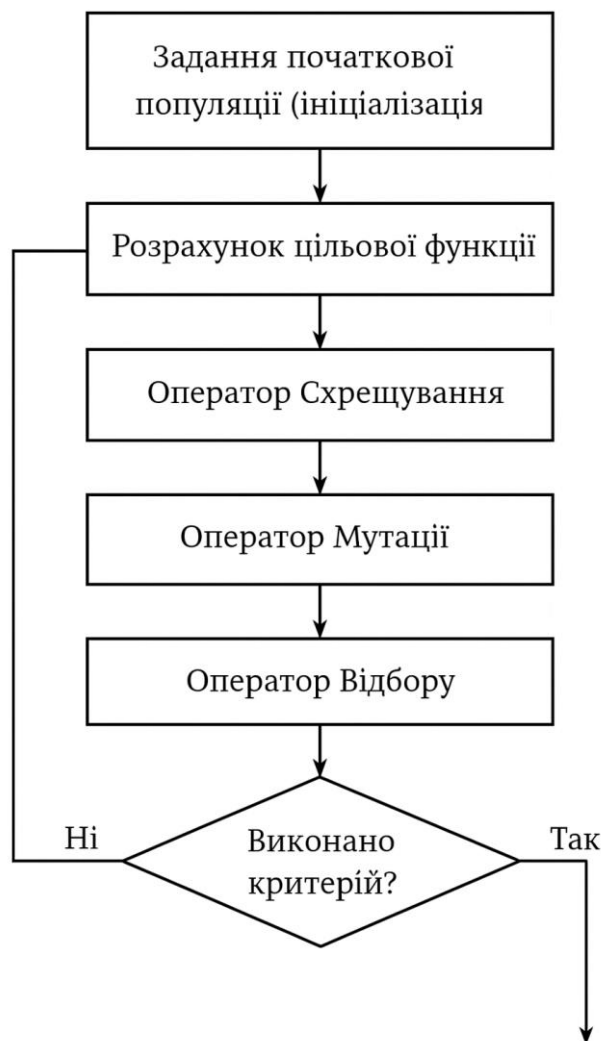


Рис. 3.14 – Демонстрація принципу роботи генетичного алгоритму

Для реалізації зазначених кроків у середовищі MATLAB була створена програма, що реалізує генетичний алгоритм із використанням цільової функції

ІТАЕ. У програмі задавалися такі вхідні дані: початкові значення коефіцієнтів PID-регулятора, діапазони їх зміни, імовірність кросинговеру та мутації, кількість поколінь і розмір популяції. Далі визначалась функція для обчислення ІТАЕ.

У результаті роботи програми отримано оптимальні значення коефіцієнтів PID-регулятора для заданої системи з урахуванням цільової функції ІТАЕ.

Більш детально розглянемо цільову функцію, яка є мірою якості роботи генетичного алгоритму. У нашому випадку використано функцію ІТАЕ, що вимірює абсолютну похибку протягом усього часу регулювання, помножену на час. Мета полягає в мінімізації значення ІТАЕ, що гарантує максимально точну та стабільну роботу системи.

Однак, як показано на рисунку 3.15, попри те, що генетичний алгоритм зміг оптимізувати параметри регулятора й досягти рівноваги системи, у ній все ще спостерігаються значні коливання та суттєве перерегулювання.

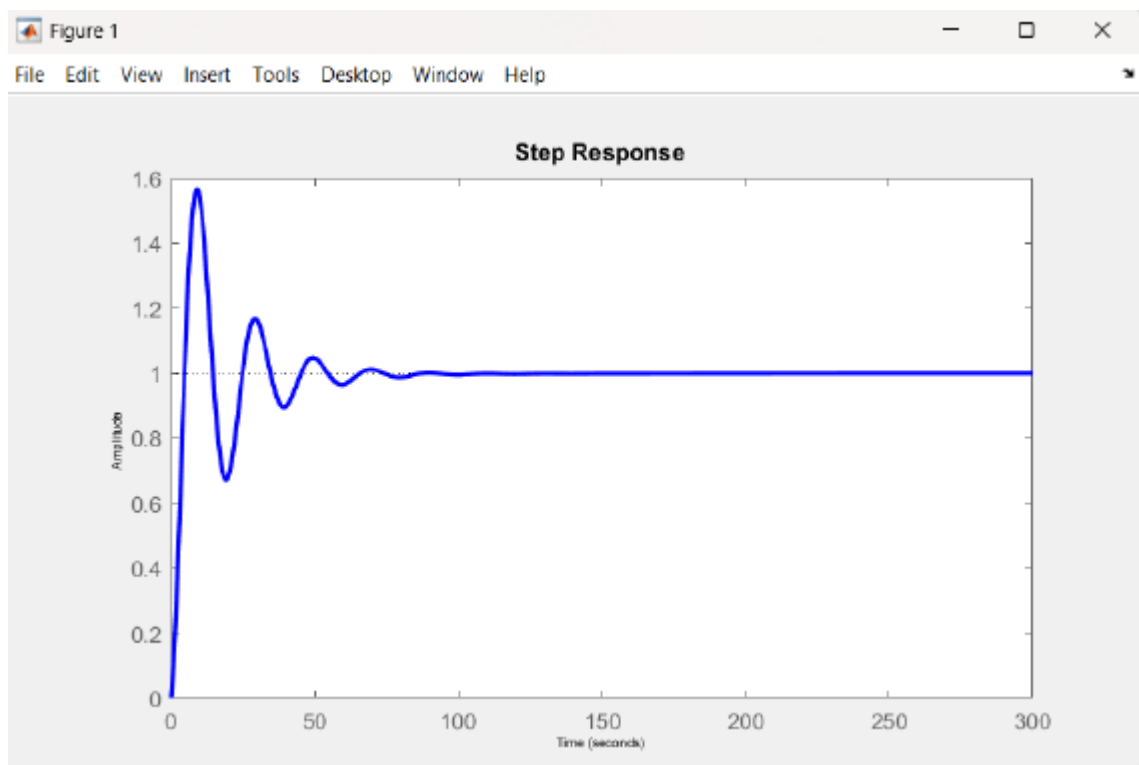


Рис. 3.15 – Перехідний процес системи з PID-регулятором, підібраним генетичним алгоритмом із цільовою функцією ІТАЕ

Це пояснюється тим, що генетичний алгоритм спрямований на мінімізацію цільової функції, але не завжди може забезпечити оптимальну поведінку системи. Оскільки він є алгоритмом пошуку параметрів, а не керування, він не враховує всіх динамічних особливостей системи та не приймає оптимальних рішень у реальному часі.

Щоб враховувати параметри системи, до генетичного алгоритму були додані параметри для оптимізації цільової функції. Це дозволяє алгоритму ефективніше знаходити оптимальні значення параметрів, які забезпечать найкращу роботу системи.

Спочатку були додані параметри, пов'язані з перерегулюванням (Overshoot) та часом наростання (Rising time). Перерегулювання (Overshoot) — це різниця між максимальним значенням вихідного сигналу системи та цільовим значенням. Час наростання (Rising time) — це час, необхідний системі для досягнення заданого рівня вихідного сигналу.

Далі були визначені штрафні функції для цих параметрів, які додаються до цільової функції під час оптимізації. Чим більше відхилення — тим більший штраф. У загальному вигляді цільова функція має вигляд:

$$J = ITAE + k_{overshoot} * (y_{max} - y_{target})^2 + k_{rise} * (t_{rise} - t_{rise_{max}})^2 \quad (3.14)$$

де:

- $ITAE$ – інтегральна абсолютна похибка;
- $k_{overshoot}$ – коефіцієнт штрафу за перерегулювання;
- y_{max} – максимальне значення вихідного сигналу;
- y_{target} – бажане значення вихідного сигналу;
- k_{rise} – коефіцієнт штрафу за час виходу на усталене значення;
- t_{rise} – фактичний час виходу на усталене значення;
- $t_{rise_{max}}$ – максимально допустимий час виходу на усталене значення.

Такий підхід до модифікації основної цільової функції дозволяє додавати власні параметри до штрафних функцій, розширюючи основну функцію оптимізації. Коефіцієнти штрафу за перерегулювання $k_{overshoot}$ і за час виходу на

усталене значення k_{rise} дають змогу врахувати вимоги до перехідного процесу — тобто швидкість і точність переходу системи до заданого стану. Збільшення цих коефіцієнтів підсилює штраф за перерегулювання або за повільну реакцію системи, що стимулює алгоритм до пошуку параметрів, які мінімізують ці недоліки.

Максимально допустимий час виходу на усталене значення $t_{rise_{max}}$ дозволяє встановити верхню межу часу стабілізації системи. Це враховує вимоги до швидкодії та запобігає надмірному ускладненню системи. Збільшення цього параметра може знизити штраф за повільний відгук, але водночас може призвести до більшого перерегулювання та коливань.

У цілому, додавання цих параметрів дозволяє врахувати додаткові вимоги та обмеження системи. Вони допомагають знаходити більш стійкі та точні рішення, що відповідають вимогам до перехідного процесу, і водночас не ускладнюють систему надмірно.

Модифікація цільової функції та додавання параметрів для оптимізації в генетичному алгоритмі дозволили досягти значного покращення керування системою. Вдалося суттєво зменшити перерегулювання та час виходу на усталене значення, при цьому зберігши низький рівень похибки. Це забезпечило більш точне та стабільне керування системою, що є критично важливим.

У результаті виконаної роботи отримано оптимальні коефіцієнти PID-регулятора (Рис. 3.16), налаштовані на необхідні параметри перехідного процесу. Це дозволяє досягти бажаної поведінки системи при переходах між станами та забезпечити стабільну роботу загалом.

Завдяки використанню генетичного алгоритму та введенню додаткових штрафних коефіцієнтів за перерегулювання й час виходу на усталене значення, вдалося досягти оптимальних результатів налаштування PID-регулятора (рис. 3.16) і забезпечити точніше керування системою відповідно до заданих вимог.

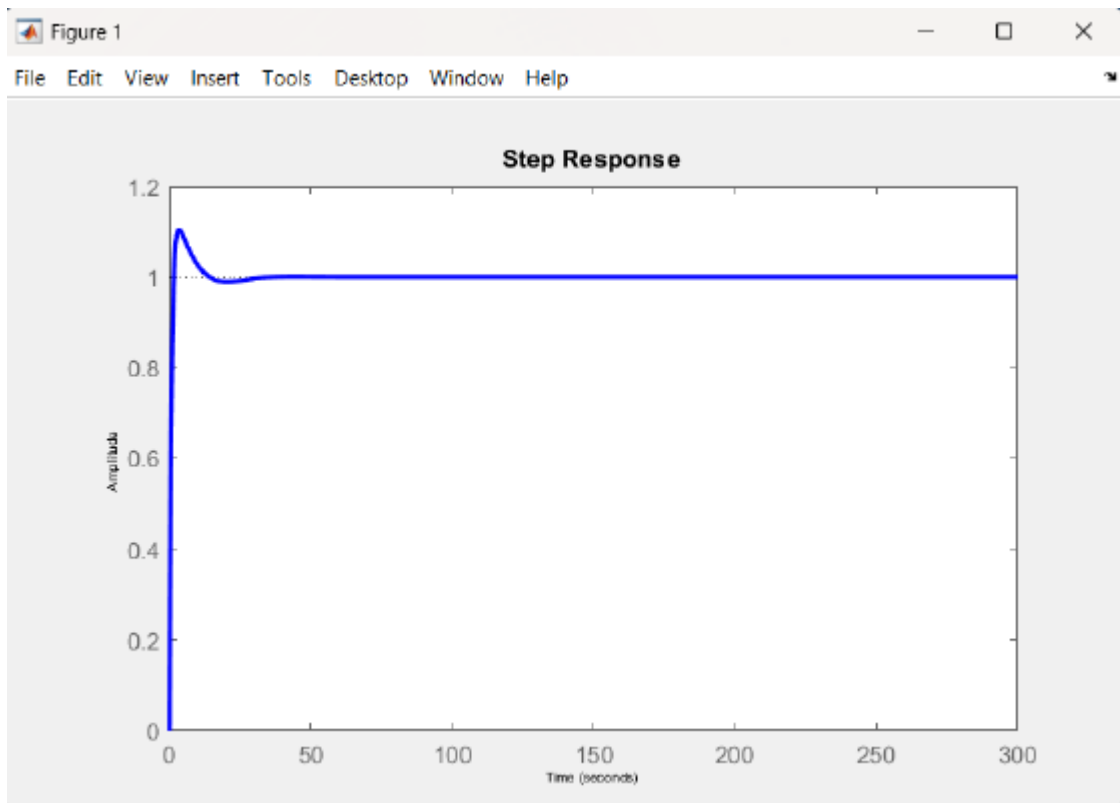


Рис. 3.16 – Перехідний процес системи з PID-регулятором, підібраним генетичним алгоритмом із цільовою функцією ІТАЕ та додатковими параметрами оптимізації

Отримаємо прямі оцінки якості з отриманими коефіцієнтами PID-регулятора, що відповідають рисунку 3.17.

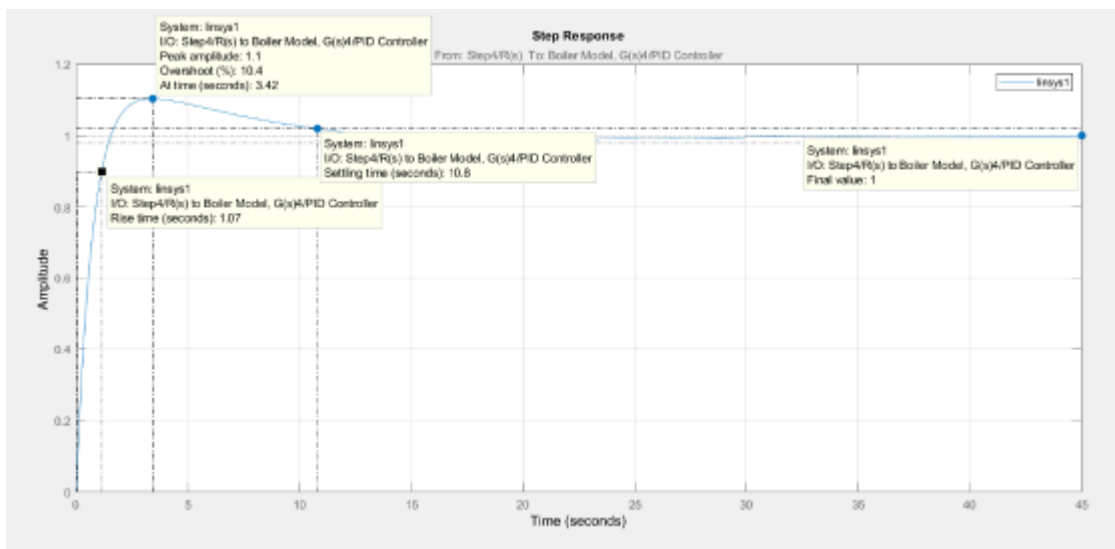


Рис. 3.17 – Перехідний процес системи з PID-регулятором із оцінками якості регулювання

Для оцінки якості роботи синтезованих регуляторів було проведено порівняльний аналіз (рис. 3.18), який включав оцінку кількох ключових параметрів перехідного процесу. Були проаналізовані такі характеристики, як перерегулювання, час перехідного процесу та усталене значення.

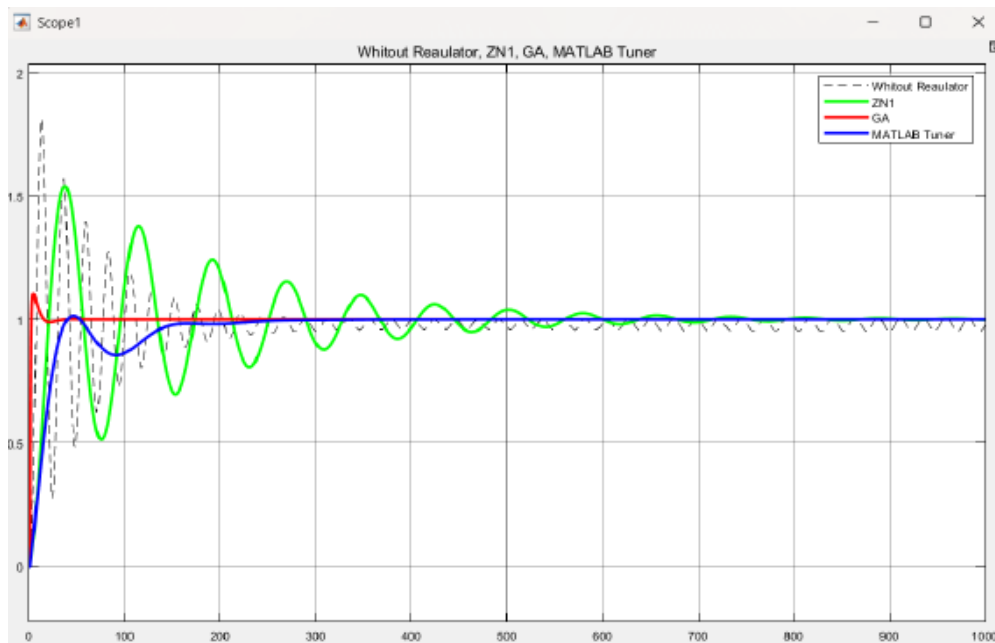


Рис. 3.18 – Перехідний процес синтезованих PID-регуляторів

На рисунку 3.19 наведено графік для порівняння ефективності нашого методу з іншими підходами. Проведемо аналіз за допомогою вбудованого додатка для PID-тюнінгу в MATLAB.

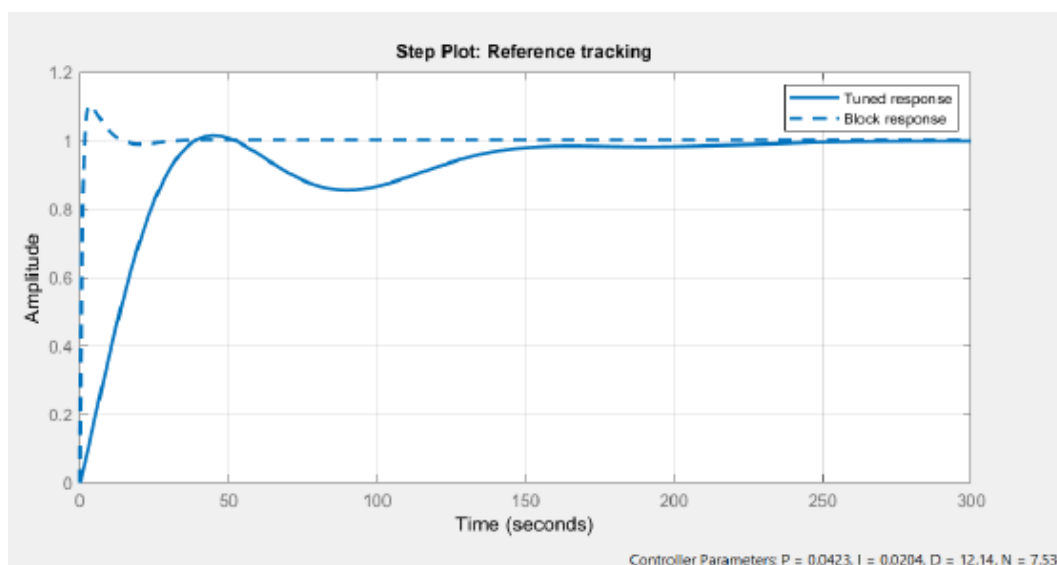


Рис. 3.19 – Перехідний процес PID-тюнера

На графіку, представленою на рисунку 2.19, можна помітити, що система, оптимізована за допомогою PID-тюнера, керує процесом більш плавно, що впливає

на час регулювання. Це проілюстровано коефіцієнтом D , підібраним для системи, де його значення дорівнює 12.

У порівнянні із системою, налаштованою за допомогою генетичного алгоритму, цей параметр у системі, отриманій із використанням вбудованого додатка, менший у 2,75 раза.

Також варто зазначити, що синтезований регулятор забезпечив менше перерегулювання і швидше встановлення усталеного значення порівняно зі вбудованим застосунком для PID-тюнінгу в MATLAB. Це свідчить про більш ефективну роботу нашого генетичного алгоритму.

Крім того, наша програма дозволяє враховувати додаткові параметри, такі як коефіцієнти штрафу за перерегулювання та час виходу на усталене значення, що може бути важливим для певних задач керування. У цілому, отримано більш оптимальний регулятор, налаштований на конкретні вимоги та параметри системи.

За результатами аналізу (таблиця 3.4) було виявлено, що регулятор, налаштований із використанням модифікованої цільової функції та штрафних функцій, показав кращі результати порівняно з регуляторами, синтезованими традиційними методами налаштування.

Таблиця 3.4

Порівняння результатів

№	Оцінка якості	Система без регулятора	ZN	Генетичний алгоритм
1	Час регулювання, T_{set}	269	619	10,8
2	Перерегулювання, Δ	81	54	10,4
3	Кількість коливань, M	11	8	0
4	Усталена похибка, e_{ss}	0,0168	9	0
5	Час досягнення першого максимуму, T_p	11,6	35,7	3,42
6	Час наростання, T_R	6,02	14,7	1.07

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано комплексний аналіз та синтез системи керування котельнею на основі досліджень стійкості, показників якості та методів оптимізації параметрів регулятора. Дослідження стійкості за першим методом Ляпунова для розімкненої та замкненої систем дало змогу оцінити динамічні властивості об'єкта та підтвердило, що застосування зворотного зв'язку є ключовою умовою забезпечення стійкості теплотехнічної установки. Результати показали, що розімкнена система є схильною до нестійких режимів, тоді як замкнена конфігурація з регулятором значно покращує поведінку системи, забезпечуючи зменшення коливань та стабілізацію температурних параметрів котла.

На цьому етапі було проведено оцінку прямих і непрямих показників якості системи керування, що включало аналіз перерегулювання, часу встановлення, статичної похибки та чутливості до збурень. Отримані результати дозволили здійснити порівняння різних варіантів керування та визначити найбільш ефективні параметри з позиції швидкодії й точності. Такий аналіз дав змогу виявити оптимальні характеристики системи, необхідні для забезпечення енергоефективної та безпечної роботи котельні.

Подальший синтез системи керування здійснювався на основі методів ZN1 та генетичного алгоритму, що дозволило порівняти традиційний емпіричний підхід із сучасним еволюційним методом оптимізації. Параметри, отримані за допомогою генетичного алгоритму, продемонстрували вищу якість регулювання, зокрема зниження перерегулювання й покращення перехідних процесів у порівнянні з класичним методом ZN1. Це свідчить про ефективність застосування інтелектуальних алгоритмів оптимізації у завданнях синтезу регуляторів для теплотехнічних систем.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі розглянуто задачу розроблення системи автоматичного регулювання газової водонагрівальної котельні. У технологічній частині представлено опис об'єкта автоматизації, а також газового водогрійного котла. Визначені вимоги до системи керування та розроблено функціональну схему автоматизації.

Для побудови математичної моделі було використано інструмент MATLAB System Identification Toolbox, що дало змогу провести структурну та параметричну ідентифікацію об'єкта керування.

У розділі аналізу системи керування було проведено дослідження стійкості з використанням першого методу Ляпунова для розімкненої та замкненої систем. Також були визначені оцінки прямих і непрямих показників якості системи керування.

Для синтезу системи керування було застосовано метод генетичного алгоритму та метод Ціглера — Ніколса №1. Проведено аналіз і порівняння результатів синтезу, які наведені у таблиці, що включає оцінки якості системи без регулятора, а також з регуляторами ZN1 і GA. За результатами порівняння можна зробити висновок, що система керування з регулятором, синтезованим за допомогою генетичного алгоритму, є найбільш ефективною.

Сформовані алгоритми для підбору параметрів методу ZN1, а також запропоновано критерій якості для реалізації задачі оптимального керування на основі генетичного алгоритму.

Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності роботи газових водонагрівальних котелень, а також для подальшого вдосконалення систем автоматичного регулювання технологічних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ахметжанов Р.Д., Федюн Р.В. Розробка і дослідження системи автоматичного керування параметрами водогрійних котлів системи централізованого теплопостачання міського мікрорайону. Донецьк : ДонНТУ, 2015. 15 с.
2. Автоматизації водогрійних та парових котлів. Режим доступу: <https://www.teploterm.com/avtomatika-dlja-kotelnyh/avtomatika-kotlov.html>
3. Автоматизована система керування котельнею https://www.svaltera.ua/solutions/typical/water_supply/7705.php
4. Виробничі процеси та системи. Режим доступу: <http://feb.tsatu.edu.ua/ebook/mn/ov/page3.html>
5. Трегуб В. Г. Проектування, монтаж та експлуатація систем автоматизації: Навч. посібник – К.: НМК ВО, 2000. – 80 с. 33. Основи проектування систем автоматизації з елементами САПР: Метод. вказівки до практичних занять для студ. напряму 0925 "Автоматизація і 115 Змн. Арк. № докум. Підпис Дата Арк. Кваліфікаційна робота комп'ютерно-інтегровані технології" ден. та заоч. форм навч./ Уклад.: В.Г. Трегуб. – К.:НУХТ, 2008. – 67 с.
6. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Теорія автоматичного керування». Частина 2 «Дослідження АСР» за освітнім рівнем «Бакалавр» для студентів спеціальності «151 Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» / Укл. Швачка О.І. – Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2019. – 32 с.
7. Попович М. Г., Ковальчук О. В. П58 Теорія автоматичного керування: Підручник. — 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656с. 11
8. Ладанюк, А.П. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ А.П. Ладанюк, В.Г.Трегуб,- 1.В. Ельперін, 40. Д.І. Дюцюра. - К.: Аграрна освіта, 2001. - 224 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ОСВІТІ, ТЕХНІЦІ ТА ПРОМИСЛОВОСТІ

МАТЕРІАЛИ
НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ

Івано-Франківськ

2025

Міністерство освіти і науки України
Інститут модернізації змісту освіти
Факультет інформаційних технологій
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
МОЛОДИХ УЧЕНИХ І СТУДЕНТІВ

«ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ОСВІТІ,
ТЕХНІЦІ ТА ПРОМИСЛОВОСТІ»

ЗБІРНИК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ

09 ЖОВТНЯ
Івано-Франківськ-2025

Підготовлено та рекомендовано до друку організаційним комітетом
 Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів
 «ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ОСВІТІ, ТЕХНІЦІ ТА ПРОМИСЛОВОСТІ»

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

голова

Зікратий С. В. проректор з науково-педагогічної роботи ІФНТУНГ

заступник голови

Піх В. Я. в.о. декана факультету інформаційних технологій ІФНТУНГ

члени комітету

Бандура В. В. завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення ІФНТУНГ

Заміховський Л. М. завідувач кафедри інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем ІФНТУНГ

Мельничук С. І. завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж ІФНТУНГ

секретаріат комітету

Заячук Я. І. доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж, ІФНТУНГ

I 74 Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості [Електронний ресурс]: матеріали Всеукр.наук.-практ. конф., Івано-Франківськ, 09 жовтня 2025 р. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2025. – 324 с. – Електронні текстові дані. – Режим доступу : <https://nung.edu.ua/department/institut-informaciyних-tekhnologiy/vidannya>
 DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17295363>

До збірника увійшли наукові матеріали тези доповідей, подані учасниками до Організаційного комітету конференції, у яких розглядаються проблеми та перспективи застосування новітніх інформаційних технологій у наукових дослідження, розвитку промисловості та освіти.

УДК 004:[3+6]

© Івано-Франківський національний технічний
 університет нафти і газу, 2025
 © Автори матеріалів, 2025
 © Заячук Я.І., 2025

<i>М. В. Шавранський, М. М. Цицик</i>	Оптимізація роботи факельних систем за допомогою сучасних алгоритмів керування	40
<i>В. О. Лось</i>	Нейромережеве моделювання трубчастої печі в процесі гідроочищення газу	43
<i>М. І. Когутяк</i>	Концептуальні засади створення навчальної лабораторії Schneider Electric	45
<i>М. І. Когутяк, Н. І. Лужний</i>	Апаратні симулятори для лабораторії Schneider Electric	47
<i>М. І. Когутяк, Б. І. Тимчук</i>	Лабораторний стенд на базі контролера modicon m580 schneider electric	50
<i>М. І. Когутяк, Р. О. Струк</i>	Навчальний стенд на базі контролера Modicon M172 та панелі оператора ET6	52
<i>М. І. Когутяк, Ю. М. Беркещук</i>	Автоматична система керування установки кондиціонування з елементами IoT	54
<i>М. І. Когутяк, В. М. Базів</i>	Віддалена система моніторингу та керування параметрами середовища виробничих приміщень	56
<i>О. І. Ластовецький, І. С. Ліхновський</i>	Вплив архітектури сенсорів зображення на їхні PSRR характеристики	58
<i>М. І. Когутяк, В. М. Стефурак</i>	Автоматизація реакторного блоку на базі IoT-технологій	60
<i>Н. С. Маслій, М. І. Когутяк</i>	Впровадження у систему керування нейрорегулятора нечіткого	62
<i>В. М. Суслівський, Л. І. Фешанич</i>	Процеси формування, управління і обміну даними комерційного обліку електричної енергії	64
<i>В. С. Зікратий, Л. О. Штаєр</i>	Динамограма як джерело інформації для оцінки технічного стану штангових глибинно-насосних установок	65
<i>М. І. Горбійчук, Ю. В. Пилипчук</i>	Математична модель статичного режиму трифазного сепаратора нафти	69
<i>В. М. Колусій, Л. І. Фешанич</i>	Адаптивна система автоматизованого керування спалюванням твердих побутових відходів у промисловій печі	71

УДК 681.518.3

ПРОЦЕСИ ФОРМУВАННЯ, УПРАВЛІННЯ І ОБМІНУ ДАНИМИ КОМЕРЦІЙНОГО ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

В. М. Суслівський, Л. І. Фешанич

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ,
Україна, volodymyr.suslovskyi-akpm242@iifnng.edu.ua

Автоматизована система комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) призначена для автоматизованого збору інформації про спожиту електроенергію об'єкта. АСКОЕ має багатофункціональну блочно-модульну архітектуру, що забезпечує гнучкість і зручність в призначеній для користувача роботі. Система повністю автоматизована, що мінімізує ручну працю та можливість введення помилкових даних [1].



Рисунок 1 - Автоматизована система комерційного обліку електроенергії

Комерційний облік – облік електроенергії, призначений для грошових розрахунків між продавцем і покупцем електроенергії (потужності) або системних послуг.

Робота з системою комерційного обліку електроенергії розділяється на кілька етапів.

Перший етап - підготовка інформаційної об'єктної структури параметрів. Формується структура енергооб'єктів, точок обліку, розрахункових перетинів, структура основної і замісної системи АСКОЕ (поділ параметрів на оперативні і статистичні дані). Здійснюється прив'язка параметрів до джерел інформації (АСКОЕ, макети) для забезпечення завантаження даних в базу.

Другий етап – щоденна робота з даними. Проводиться завантаження результатів вимірювань з АСКОЕ (в автоматичному або ручному режимі), введення положень обхідних вимикачів (при необхідності), аналіз відсутніх даних, недостовірної і некомерційної інформації, розрахунок сумарних показників, розрахунок короткострокових прогнозів електроспоживання, формування звітних форм, макетів.

Третій етап – дії по закінченню звітних періодів (місяць, квартал, рік). Проводиться розрахунок інтегральних значень по закінченню інтервалу, формування звітних форм і макетів, перевірка збіжності даних макетів. Передача даних в енергетичні компанії та суміжним суб'єктам.

Основні функції обробки даних включають в себе:

- завантаження даних з різних систем АСКОЕ в темпі процесу;
- завантаження даних з XML-макетів;
- розрахунок сумарних показників на основі завантажених свідчень у точках обліку (з урахуванням стану обхідних вимикачів);
- контроль і упевнення в завантажених даних;
- аналіз і редагування стану об'єктів і засобів вимірювань;
- формування XML-макетів;
- формування спеціалізованих звітних форм у форматі Microsoft Excel.
- збір даних результатів вимірювання може здійснюватися з різних джерел:
- з власної бази даних АСКОЕ
- з систем АСКОЕ суміжних суб'єктів за допомогою XML-макетів, або по віддаленому доступу.

Використання АСКОЕ дозволяє підприємствам контролювати енергоспоживання, виявляти втрати, оптимізувати витрати та забезпечує прозорий комерційний облік між споживачем та енергопостачальником.

Літературні джерела

1 Автоматизована система комерційного обліку електроенергії. Режим доступу <https://info-prime.com.ua/en/askue>.

УДК 621.643.6

ДИНАМОГРАМА ЯК ДЖЕРЕЛО ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ШТАНГОВИХ ГЛИБИННО-НАСОСНИХ УСТАНОВОК

В. С. Зікратий, Л. О. Штасер

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ,
Україна, viktor.zikratiy-a17424@nung.edu.ua*

Штангові глибинно-насосні установки (ШГНУ) є основним засобом механізованого видобутку нафти, а контроль їх технічного стану безпосередньо впливає на ефективність та безпеку експлуатації свердловин. Динамограма — графік залежності навантаження на полірований шток від ходу плунжера — є ключовим джерелом даних для оцінки стану підземної частини системи. Динамограма дозволяє отримувати дані в реальному часі і оперативно виявляти дефекти. Важливим аспектом є швидка діагностика, яка зводить до мінімуму простій установки і дозволяє своєчасно виконати коригувальні дії. У цьому контексті важливо розглядати та інтерпретувати типові динамограми, що відображають різні несправності.