

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет

Кафедра «Автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем»



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА
на тему «Підвищення ефективності автоматичного керування випічкою хліба в печі
тунельного типу»

(назва кваліфікаційної роботи згідно наказу ОНТУ)

Здобувача (ки) Бондаренко М.Ю.

(прізвище, ініціали)

II курсу Амз-20 групи

Керівник к.т.н., доц. Муратов В.Г.

(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти:

(посада, прізвище та ініціали)

(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від _____ 20____ р., протокол № _____.

Завідувач(ка) кафедри АТПіРС
(назва кафедри)

(підпис)

Світій І.М.
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса – 2023 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет	<u>Автоматизації та робототехніки</u>
Кафедра	<u>Автоматизації технологічних процесів і</u> <u>робототехнічних систем</u>
Ступінь вищої освіти	<u>Магістр</u>
Спеціальність	<u>151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології</u>
Освітньо-професійна програма	<u>Комп'ютерні системи та програмна інженерія в</u> <u>автоматизації</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри АТПіРС
І.М. Світий

« _____ » _____ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Бондаренка Микити Юрійовича

1. Тема роботи «Підвищення ефективності автоматичного керування випічкою хліба в печі тунельного типу»

Затверджена наказом ОНТУ від 29.11.22 р. _____ наказ №877-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи _____

3. Вихідні дані до випускної роботи: матеріали виконаних індивідуальних завдань (ІЗ) виробничої практики, дипломної роботи бакалавра, дослідницької практики, курсових та самостійних робіт, виконаних відповідно до ІЗ.

4. Зміст кваліфікаційної роботи (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ (актуальність роботи, зв'язок з науковими напрямками робіт університету, мета та задачі дослідження, об'єкт та предмет дослідження, методи дослідження, наукова новизна отриманих результатів, практичне значення отриманих результатів, апробація результатів роботи, публікації, структура та об'єм роботи).

Розділ 1. Технологічний процес випічки хліба і задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.

Розділ 2. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП випічки хліба.

Розділ 3. Вдосконалення алгоритмів, які реалізують функції регулювання САК технологічного процесу випічки хліба, на основі застосування логічного регулятора та штучних нейронних мереж.

Розділ 4. Реалізація і підготовка до впровадження результатів роботи.

Додатки (допоміжні матеріали, ксерокопії програм конференцій, статей, патентів).

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж	Гурський О.О. к.т.н. доцент каф. АТПіРС		
Розробка та дослідження САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію	Хобін В.А. д.т.н., проф. зав.каф. АТПіРС		

7. Дата видачі завдання _____

Керівник

Завдання прийняв до виконання

Муратов В.Г.

Бондаренко М.Ю.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ та загальна характеристика роботи		
2	Технологічний процес та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування		
3	Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП		
4	Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж		
5	Розробка та дослідження САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію		
6	Реалізація та підготовка до впровадження результатів роботи		
7	Оформлення додатків та роботи в цілому		
8	Здача роботи на перевірку керівникові, виправлення зауважень, підпис керівника		
9	Брошування роботи, представлення її завідувачу кафедри, підпис, направлення роботи на зовнішнє рецензування та захист у ЕК		

Здобувач-дипломник Бондаренко М.Ю. Керівник роботи Муратов В.Г.

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник Бондаренко М.Ю.

ПІБ

Підпис

АНОТАЦІЯ

Бондаренко М.Ю. «Підвищення ефективності автоматичного керування випічкою хліба в печі тунельного типу».

Кваліфікаційна робота магістра. – Одеса: ОНТУ 2023. – 133с.
Бібліогр.:_19_. Іл.:_105_. Табл._13_.

Основною метою роботи є підвищення ефективності процесу випічки хліба за рахунок вдосконалення існуючих алгоритмів автоматичного керування технологічним процесом. Удосконалення алгоритмів керування проводилося шляхом підвищення динамічної точності алгоритмів регулювання. В якості базового було використано пропорційно-інтегрально-диференційний алгоритм регулювання. В даній роботі удосконалені алгоритми САР температури у першій зоні випічки. В алгоритмі регулювання одночасно реалізовано компенсацію запізнення у власному русі (упереджувач Сміта) та автономність відносно зміни керуючої дії у контурі регулювання температури у зоні зволоження. Надалі підвищення ефективності САР проводилося шляхом дослідження доцільності використання нечіткого алгоритму регулювання. Надалі розроблену систему керування було реалізовано у цифровому вигляді.

Аналіз працездатності САР проводився шляхом аналізу на дотримання гранично припустимих вимог та аналізу САР на грубість.

Ключові слова: випічка хліба, тунельна піч, упереджувач Сміта.

ЗМІСТ

	стор.
Перелік умовних позначень, символів і одиниць.....	7
Вступ.....	8
Розділ 1 Технологічний процес випічки хліба і задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.....	12
1.1 Короткий опис технологічного процесу випічки хліба і основного обладнання	12
1.2 Аналіз впливу режимів ведення ТП і роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз відповідних регламентів і наслідків їх порушення	19
1.3 Аналіз існуючих САК технологічного процесу випічки хліба	22
1.4 Комплекс математичних моделей ТП випічки хліба як об'єкту регулювання, їх реалізація в формі імітаційних моделей і результати тестування моделей	23
1.5 Типові структури і алгоритми САК ТП, що реалізують функції регулювання, результати їх параметричної оптимізації і перевірка на робастність (грубість).....	31
1.6 Недоліки відомих САК ТП випічки хліба, обґрунтування напрямків удосконалення САК як нових джерел підвищення економічної ефективності технологічного процесу	44
1.7 Висновки за розділом.....	45
Розділ 2 Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП випічки хліба	46
2.1 Специфічні особливості ОР і обґрунтування вибору методів корекції САР для підвищення їх динамічної точності	46
2.2 Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності.....	46
2.3 Оптимальний параметричний синтез САР підвищеної динамічної точності та аналіз результатів синтезу	51
2.4 Висновки за розділом.....	58
Розділ 3 Вдосконалення алгоритмів, які реалізують функції регулювання САК технологічного процесу випічки хліба, на основі застосування логічного регулятора та штучних нейронних мереж	59
3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем управління побудованих на базі апарата нечіткої логіки та штучної нейронної мережі для розглянутого об'єкта керування	59
3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB/Simulink моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування з нелінійними статичними характеристиками	60
3.3 Синтез САР з нелінійною моделлю ОК і традиційним ПД-регулятором ...	62
3.4 Синтез САР з нелінійним ОК на основі нечіткого регулятора.....	67
3.5 Синтез САР з нелінійним ОК на основі нейронного регулятора.....	81

	стор.
3.6 Аналіз результатів функціонування САУ з традиційним регулятором, з регулятором побудованим на базі апарату нечіткої логіки і з нейронним регулятором.....	99
3.7 Висновки за розділом.....	101
Розділ 4 Реалізація і підготовка до впровадження результатів роботи	103
4.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми управління процесом випічки хліба і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок.....	103
4.2 Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів управління	116
4.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.....	129
4.4 Висновки за розділом.....	129
Висновки.....	131
Список використаної літератури.....	132

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ОДИНИЦЬ

АК - алгоритм керування;

ВМ - виконавчий механізм;

ОК - об'єкт керування;

ОР - об'єкт регулювання;

ПЗО - пристрій зв'язку з об'єктом;

РО - регулюючий орган;

САК - система автоматичного керування;

САР – система автоматичного регулювання;

СКЗ - спрощений коригуючий зв'язок;

ТП - технологічний процес.

ВСТУП

Автоматизація – один з основних факторів сучасної науково-технічної революції. Її ціль – підвищення ефективності праці, поліпшення якості продукції, та зменшувати брак на підприємстві. Технологічний процес випічки призначений для закріплення структури сформованих виробів, а також отримання споживчих властивостей готового продукту.

Найпродуктивнішою вважається тунельна конструкція печей, прикладом якої може служити піч ППЦ-1. Ці печі реалізують неперервний технологічний процес. Піч, як об'єкт керування, потребує регулювання великої кількості технологічних та експлуатаційних параметрів. Існуючі штатні САР температури, що реалізувалися на апаратних засобах регулювання не забезпечують необхідної точності підтримки заданих значень температур.

На кафедрі автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем одеського національного технологічного університету, в рамках випускної роботи магістра, з метою підвищення ефективності випічки хліба було вирішено задачу підвищення ефективності системи автоматичного регулювання (САР) параметрів виробництва пари шляхом підвищення інтелектуального рівню алгоритмів керування ключовими технологічними процесами за рахунок підвищення динамічної точності керування процесом.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана в Одеському національному технологічному університеті (ОНТУ) та відповідає напряму № 4 наукової діяльності ОНАПТ «Створення нового вискоефективного обладнання, автоматизація виробничих процесів харчових та зернопереробних виробництв», а також держбюджетній науково-дослідній роботі: «Інтелектуальні системи з еволюційними властивостями для управління технологічними процесами переробних виробництв АПК», №ГР 0106U001440. Здобувач приймав участь у цій НДР як виконавець.

Мета та завдання дослідження.

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу випічки хліба шляхом побудови високоефективної системи автоматичного керування.

Для досягнення цього необхідно вирішити наступні завдання:

- конкретизація завдання дотримання регламентів управління технологічним процесом випічки хліба, розробка та реалізація комплексу його моделей як об'єкта регулювання в імітаційній середовищі Matlab;
- розробка та параметрична оптимізація алгоритмів регулювання у середовищі Simatik Step 7, порівняльний аналіз САР;
- конкретизація задачі та розробка алгоритмів логічного керування технологічним процесом випічки хліба;
- вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізацію керуючих впливів;
- розробка контролерно-комп'ютерної мережі, програмування алгоритмів регулювання та логічного управління САК;
- розробка SCADA системи з використанням додатку WinCC flexible для автоматизованого робочого місця технолога та наладчика САК;
- розробка проектної документації технічного забезпечення САК, включаючи питання охорони праці;
- попереднє обґрунтування економічної доцільності реалізації розробки.

Об'єкт дослідження – керований технологічний процес випічки хліба.

Предмет дослідження – системи автоматичного управління технологічним процесом випічки хліба, включаючи моделі процесу об'єкта управління.

Методи дослідження:

- методи активного та пасивного експерименту;
- метод типової статистичної ідентифікації та інженерні методики ідентифікації моделей ОК;
- метод оптимального параметричного синтезу;
- метод компенсації запізнення в контурі регулювання з використанням упереджувача Смітта;

- метод системного аналізу систем автоматичного керування;
- метод імітаційного моделювання;
- планування та проведення натурних експериментів, обробки їх результатів та ідентифікації моделей ОУ.

- теорії автоматичного управління та її підрозділів – статистичної теорії автоматичних систем, теорії систем із запізненням, теорії систем гарантуючого управління, теорії цифрових систем управління.

Наукова новизна одержаних результатів:

вперше обґрунтовано:

- загальна концепція побудови ефективної САУ процесом випічки хліба, включаючи концептуальну модель ОУ та варіанти функціональної структури її керуючого пристрою, яка дозволяє розробляти такі САУ для парових котлів з різним набором доступних для безперервної зміни впливів керуючих і джерел безперервної інформації про показники якості випічки хліба;

- показники випічки хліба, що характеризують її якість побічно, але доступні для квазінеперервного виміру безпосередньо в ході процесу, які дозволяють у реальному часі автоматично стабілізувати значення основних показників якості пари в умовах інтенсивних неконтрольованих збурень.

вперше розроблено:

- імітаційна ММ процесу випічки хліба, що адекватно описує динаміку каналів регулювання, яка дозволяє при розробці САУ пари проводити комп'ютерні експерименти з налагодження та параметричної оптимізації алгоритмів управління та порівняльного аналізу її варіантів;

- спеціальні САР з компенсацією запізнення в контурі регулювання систем автоматичного регулювання технологічних параметрів випічки хліба, що дозволяють підвищити швидкодію при регулюванні параметрів, підвищити точність управління;

- розробка алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК, на основі застосування апарату нечіткої логіки та штучних нейронних мереж;

Практичне значення одержаних результатів полягає в:

- підвищенні продуктивності та енергетичної ефективності процесів випічки хліба, підвищенні та стабілізації якості випічки хліба;
- застосування розробленої імітаційної моделі для подальшого вдосконалення САУ випічки хліба.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем вищої освіти зроблено наступне: сформульовані найбільш загальні особливості процесу випічки хліба як ОУ, її структура та завдання управління; обґрунтовано набір функцій АРМ дослідника процесу випічки хліба; розроблено програмно-технічне забезпечення АРМ; визначено концептуальну структуру процесу випічки хліба як ОУ, виявлено взаємозв'язки між змінними процесами; описані на якісному рівні якості його каналів; обґрунтовано процедуру ідентифікації моделі процесу; модель реалізована серед імітаційного моделювання; обґрунтовано її адекватність; - обґрунтовано функціональну організацію САУ, алгоритми управління; обґрунтовано склад інформативних змінних, що побічно характеризують якість випічки хліба; розроблено принципи побудови та програмно-технічне забезпечення для реалізації каналу вимірювання.

Апробація результатів випускної роботи магістра. Основні положення і результати роботи доповідалися і обговорювалися на науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти ОНТУ (2023).

Публікації. Підготовлено комплект документів для подачі патенту на корисну модель на тему «Спосіб автоматичного керування випічкою хліба».

Структура і обсяг роботи. Випускна робота магістра складається з вступу, основної частини, що включає 4 розділи, висновків, списку використаних джерел і додатків.

РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ВИПІЧКИ ХЛІБА І ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Короткий опис технологічного процесу випічки хліба і основного обладнання

В даний час в хлібопекарському виробництві застосовують два види поточкових ліній, що відрізняються за ступенем механізації. Вироблення хлібобулочних виробів в асортименті здійснюється на механізованих лініях, що дозволяють в межах асортиментних груп переходити з виробництва одного виду продукції на виробництво іншого. Масові види продукції (батони, фірмовий і круглий подовий хліб) виробляють на спеціалізованих комплексно-механізованих лініях і автоматизованих лініях.

Стадії технологічного процесу. Приготування хліба можна розділити на наступні стадії:

- підготовка сировини до виробництва: змішування ,зберігання продукції, аерація, просіювання і дозування борошна; підготовка питної води; приготування і темперування розчинів солі і цукру, жирових емульсій та дріжджових суспензій;

- дозування рецептурних компонентів, заміс і бродіння опари і тіста;

- оброблення - розподіл дозрілого тіста на порції однакової маси;

- формування - механічна обробка тістових заготовок з метою надання їм певної форми;

- розстійка - бродіння сформованих тістових заготовок. Після вистоювання - тістові заготовки можуть піддаватися надрізки (батони, булки і ін.);

- гідротермічна обробка тістових заготовок і випічка хліба;

- охолодження, відбраковування і зберігання хліба.

Характеристика комплексів устаткування.

Початкові стадії технологічного процесу виробництва хліба виконуються за допомогою комплексів устаткування для зберігання, транспортування і підготовки до виробництва борошна, води, солі, цукру, жиру, дріжджів та інших видів сировини. Для зберігання сировини використовують мішки, металеві та залізобетонні ємкості і бункера. На невеликих підприємствах застосовують механічне транспортування мішків з борошном навантажувачами, а борошно - норіями, ланцюговими і гвинтовими конвеєрами. На великих підприємствах використовують системи пневматичного транспорту борошна. Рідкі напівфабрикати перекачуються насосами.

Наступний комплекс лінії включає обладнання для вистоювання, укладання та випічки тістових заготовок. До нього відносяться розстойні шафи, механізми для укладання, пересадки, нарізки тістових заготовок і хлібопекарські печі.

Завершальний комплекс обладнання лінії забезпечує охолодження, пакування, зберігання та транспортування готових виробів. Він містить обладнання остівочні відділень, експедицій і складів готової продукції.

На рис.1.1 показана машинно-апаратна схема лінії для виробництва одного з масових видів хліба - подового хліба з пшеничного борошна.

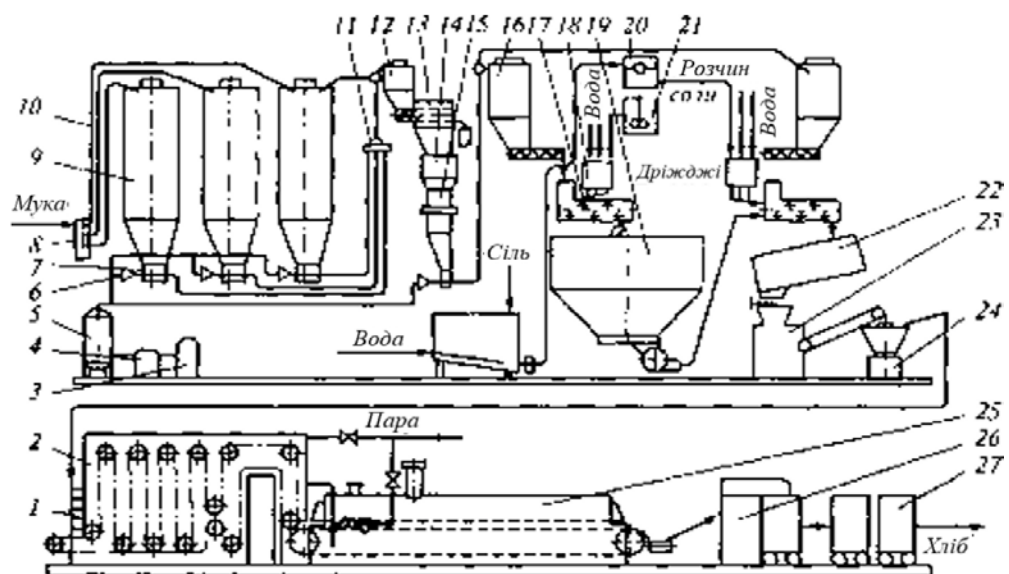


Рис. 1.1 – Технологічна лінія виробництва хліба

Борошно доставляють на хлібо завод в автоборошновозах, що приймають до 7... 8 т борошна. Автоборошновозах зважують на автомобільних вагах і подають під розвантаження. Для пневматичної розвантаження борошна автоборошновозах обладнаний повітряним компресором і гнучким шлангом для приєднання до приймально-го щитка 8. Борошно з ємкості автоборошновозах під тиском по трубах 10 завантажують в силоси 9 на зберігання.

Додаткове сировина-розчин солі і дріжджову емульсію зберігають в ємкостях 20 та 21. Розчин солі попередньо готують в спеціальній установці.

При роботі лінії борошно з силосів 9 вивантажують в бункер 12 з застосуванням системи аерозольтранспорту, який крім труб включає в себе компресор 4, ресивер 5 і повітряний фільтр 3. Витрата борошна з кожного силосу регулюють за допомогою роторних живильників 7 і перемикачів 11.

Для рівномірного розподілу стисненого повітря при різних режимах роботи перед роторними живильниками встановлюють ультразвукові сопла 6.

Програму витрати борошна з силосів 9 задає виробнича лабораторія хлібо заводу на основі досвідчених випічок хліба з суміші борошна різних партій. Таке змішування партій борошна дозволяє вирівнювати хлібопекарські якості рецептурної суміші борошна, що надходить на виробництво.

Далі рецептурну суміш борошна очищають від сторонніх домішок на просіювачі 13, забезпеченому магнітним уловлювачем, і завантажують через проміжний бункер 14 і автоматичні ваги 15 в виробничі силоси 16. У даній лінії для отримання хорошої якості хліба використовують двофазний спосіб приготування тіста.

Перша фаза - приготування опари, яку замішують в тістомісильній машині 17. У ній дозують борошно з виробничого силосу 16, також від темперованого воду і дріжджову емульсію через дозирочну станцію 18. Для замісу опари використовують від 30 до 70% борошна. З машини 17 опару завантажують в шостисекційний бункерний агрегат 19.

Після бродіння протягом 3,0 ... 4,5 годин опару з агрегату 19 дозують в другу тістомісильну машину з одночасною подачею решти борошна, води і розчину солі. Другу фазу приготування тіста завершують його бродінням в ємкості 22 протягом 0,5 ... 1,0 год.

Готове тісто стікає з ємкості 22 в прийомну лійку тістоділительної машини 23, призначеної для отримання порцій тіста однакової маси. Після обробки порцій тіста в округляючу машині 24 утворюються тістові заготовки кулястої форми, які за допомогою маятникового укладальника 1 розкладають в осередку колисок шафи 2. Розстійка тістових заготовок проводиться протягом 35 ... 50 хв. При відносній вологості повітря 65 .. 85% і температурі 30 .. 40 ° С в результаті бродіння структура тістових заготовок стає пористою, обсяг їх збільшується в 1,4 ... 1,5 рази, а щільність знижується на 30 .. 40%.

Заготовки набувають рівну гладку еластичну поверхню. Для запобігання тістових заготовок від виникнення при випічці тріщин-розривів верхньої кірки в момент перекладки заготовок на під печі 25 їх піддають надрізи або наколці.

На вхідній ділянці пекарної камери заготовки 2 ... 3 хв. піддаються гігротермічній обробці зволожувальним пристроєм при температурі 105 ... 110 ° С. На серед- ньому і вихідному ділянках пекарної камери заготовки випікають при температурі 200 .. 250 ° С. У процесі руху з подом печі тістові заготовки послідовно проходять всі теплові зони пекарної камери, де випікаються за проміжок часу від 20 до 55 хв, відповідний технологічним вимогам на випускаємий вид хліба. Випечені вироби за допомогою укладальника 26 завантажують в контейнери 27 і направляють через уривчасті відділення в експедицію.

Мета ведення процесу випічки хліба – отримання готового продукту із заданими показниками якості. При промисловому виробництві досягнення мети може бути виправдано тільки тоді, коли технологічний процес має сенс реалізувати, коли виконується цілий ряд вимог до технологічного процесу.

Технологічний процес випічки хліба доцільно реалізовувати, якщо:

-є достатній запас тістових заготовок на 1 годину роботи

- тиск пари в паропроводі повинне бути не меншим 0,2МПа;
- повинна бути електроенергія в колах живлення циркуляційного насоса із середньостатистичними параметрами мережі;

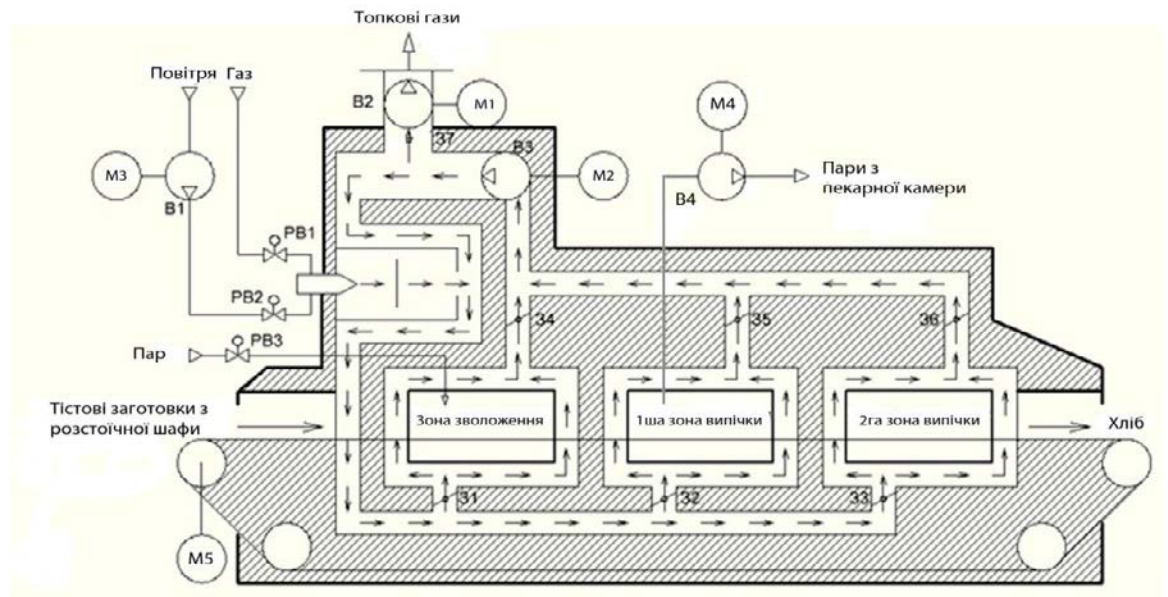


Рис. 1.2 – Технологічна схема процесу випічки хліба

Одним з відповідальних періодів процесу випічки є перший період. Він починається з моменту надходження тістової заготовки в зону зволоження пекарної камери. У зону зволоження за допомогою паро зволожувального пристрою подається рівномірно розподілений насичений пар низького тиску (0,1-0,5 МПа). У зоні зволоження виходить паровоздушна суміш з високою концентрацією пара. На поверхні хліба або в малій околиці поверхні хліба вологість наближається до 100% (відносна вологість) з рахунок конденсації на поверхні заготовки.

Відносна вологість середовища $\phi = 95-100\%$. На холодній поверхні тістової заготовки в зоні зволоження проходить пар. При цьому за рахунок фазового переходу виділяється значна кількість тепла. В цьому періоді випічки проходить інтенсивний зовнішній тепло і масообмін, в результаті якого здійснюється прогрів заготовки.

Маса тістової заготовки в першому періоді збільшується за рахунок маси конденсату на його поверхні пара. Тому в момент закінчення конденсації маса

тістової заготівки стає максимальною. Потім маса тістової заготівки поступово зменшується у зв'язку з випаровуванням вологи з поверхні і з поверхневого шару тістової заготівки.

У першому періоді випічки зовнішній шар тіста з пшеничного та житнього борошна при пароволоженні і прогріванні до 85-95 °С втрачають формовану здатність.

У другому періоді випічки підвищується температура поверхні тесту-хліба. Відбувається випаровування з верхніх шарів вологи макро- і мікрокапілярів. Це призводить до уповільнення випаровування вологи і виходить частково зневоднений шар. До кінця цього періоду вологість цього шару значно знизиться, теплопровідність зменшується, а температура поверхні тісту-хліба досягає 100°С і більше. На поверхні тісту-хліба настає початкова фаза утворення кірки. Початок утворення кірки відповідає температурі поверхні 200 - 215°С, при якій змінюється колір поверхні і проходить стабілізація розмірів і обсягу випікається виробу. Цей момент стає граничним між другим і третім періодом випічки.

Під час третього періоду випічки внутрішні шари тісту-хліба перетворюються в м'якуш, хоча і залишаються повністю непропеченими. Освіта кірки і структури м'якоті перешкоджає подальшому збільшенню обсягу хліба. До цього моменту закінчується збільшення обсягу хліба і зміна його геометричних розмірів. Температура зони випаровування постійна (140-140°С). При цьому температура на поверхні досягає 200 °С.

Опис конструкції технологічного агрегату та особливостей його експлуатації

Піч обладнання, що використовується в пекарнях для випічки хліба і булочних виробів. Вона обмежена головним затвором приводу теплоносія, фланцем для приєднання центральної витяжки, головним затвором подачі пари, затвором для відведення конденсату і клемником пульта управління для підведення електричної енергії. Пекарна камера має форму тунелю, по якому рухається сіткова стрічка з виробами, призначеними для випічки.

Опалювальне простір - простір через яке протікають продукти згоряння. Складається з опалювальних радіаторів, змішувальної камери, розподільних каналів і колекторів. Колектор - простір виконує функцію збірника охолоджених продуктів згоряння. Розподільні канали підводять гарячі продукти згоряння до опалювальних радіаторів. Зграєві (поворотні) канали відводять охолоджені продукти згоряння від нагрівальних радіаторів.

Камера пальників - простір, що складається з камери згоряння і зовнішнього кожуха. Між зовнішнім кожухом камери пальників і кожухом камери згоряння протікають зворотні продукти згоряння, які одночасно охолоджують обшивку камери згоряння. Камера згоряння - простір, в якому відбувається спалювання палива в присутності повітря.

Циркуляційний вентилятор - вентилятор, що забезпечує примусову циркуляцію продуктів згоряння в системі опалення і одночасно підтримує розрідження у всій системі опалення. Вся робоча характеристика циркуляційного вентилятора лежить в області розрідження. Його функція забезпечується вакуумним вимикачем. У разі зменшення розрідження у всмоктуючому патрубку циркуляційного вентилятора нижче встановленої величини, припиняється подача тепла автоматичним блокуванням пальники - пальник не можна пустити вхід.

Вентилятор вимушеної відстрочки продуктів згоряння забезпечує стійкі тягові відносини відтягнення продуктів згоряння. Робоча характеристика цього вентилятора знаходиться цілком в області розрідження. Робочі параметри вентилятора можна регулювати дросельною заслінкою у впускному трубопроводі. Його функція захищена датчиком контролю числа обертів вала вентилятора. У разі, коли вал не обертається, припиняється подача тепла спрацьовуванням автоматичного блокування пальника.

Вентилятор вторинних парів призначений для оптимального встановлення кількості парів, відсмоктуються з окремих термічних зон пекарної камери спільно з регулюванням за допомогою дросельних заслінок. Одночасно виконує вимогу відводу вторинних парів через один головний

відведення, спільний з відводом продуктів згоряння. Робоча характеристика цього вентилятора лежить цілком в області розрідження.

Ізоляція - ефективне зниження теплових втрат від випромінювання, здійснюється за допомогою накладання відповідного теплоізоляційного матеріалу, наприклад, мінерального повсті. Ізольований матеріал негорючий, протистоїть високим температурам до 700°C і зберігає свої теплоізоляційні властивості протягом тривалого часу. Максимальна температура поверхні кожуха печі не повинна бути вище 40°C , вежі з пальниками 60°C . Максимальна температура кожуха печі віднесена до температури навколишнього середовища печі (на відстані 1 м від печі приймається 25°C).

1.2 Аналіз впливу режимів ведення ТП і роботи обладнання на його техніко-економічні показники, аналіз відповідних регламентів і наслідків їх порушення

Основу нормативів становлять три основних регламенти відповідно до яких треба визначити регламентовані технологічні параметри.

Технологічний регламент – визначає умови, при яких в результаті технологічного процесу виходить продукт із заданими властивостями. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення від номіналу технологічних параметрів. Для технологічного процесу такими параметрами є: Θ з.з.- температура в зоні зволоження ; Θ_1 – температура в першій зоні випічки.

Експлуатаційний регламент – визначає умови нормальної безаварійної роботи технологічного обладнання. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення експлуатаційних параметрів цього технологічного обладнання. До таких параметрів можна віднести ; Θ т.г- температура топкових газів ; P_g – тиск газу у мережі.

Техніко-економічний і екологічний регламент – визначає умови ефективного ведення процесу і його екологічності. Він являє собою набір

номінальних або гранично-допустимих значень техніко-економічних і екологічних параметрів.

При відхиленні параметрів процесу випічки хліба від регламентованих значень, обумовлених зміною параметрів, що характеризують умови ведення процесу, навіть при досить ефективному керуванні ним, можуть перевищувати припустимі значення. Однак при виході за допуски технологічних регламентів технологічний процес не зупиняється, а вихід за допуски ліквідується із часом. Наслідком виходу технологічних параметрів за допуски є зниження якості пива і збільшення енерговитрат.

Допуски на відхилення поточних значень регламентованих параметрів діляться на тривалі та короточасні. Припустимі відхилення визначають зону незначних відхилень, середнє значення параметру якої можна вважати близьким до нормативного, тому ці відхилення не ліквідують. Короточасні припустимі відхилення параметрів перевищують зону незначних відхилень і призводять до зниження ефективності процесу, тому вони припустимі тільки протягом обмеженого часу, що задається й входить у регламент. Вихід параметрів за зону короточасно припустимих відхилень свідчить про відхилення технологічного процесу або експлуатації обладнання, що можуть призвести до аварії. Для аналізу нормативів ведення процесу охолодження пива складемо таблицю регламентів (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів

№	Найменування параметрів	Позначення	Одиниця вимірювання	Ном. значення параметру	Припустимі відхилення від номіналу		
					Тривалі ($t \rightarrow \infty$)	Короточасні ($0 < t < \infty$)	
					Велич.	Велич.	t, сек
1	Температура в зоні зволоження	θ_{33} ,	$^{\circ}\text{C}$	100	± 1	± 3	200
2	Температура в першій зоні випічки	θ_1 ,	$^{\circ}\text{C}$	210	± 2	± 6	200

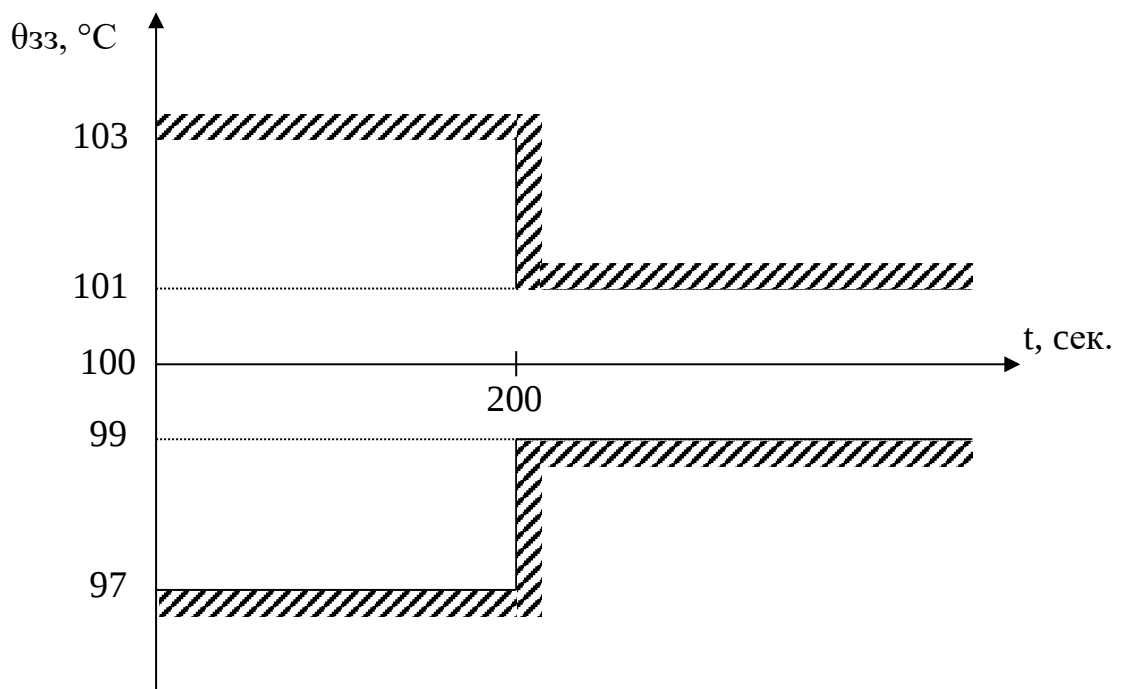


Рис. 1.3 – Регламентна зона для температури в зоні зволоження

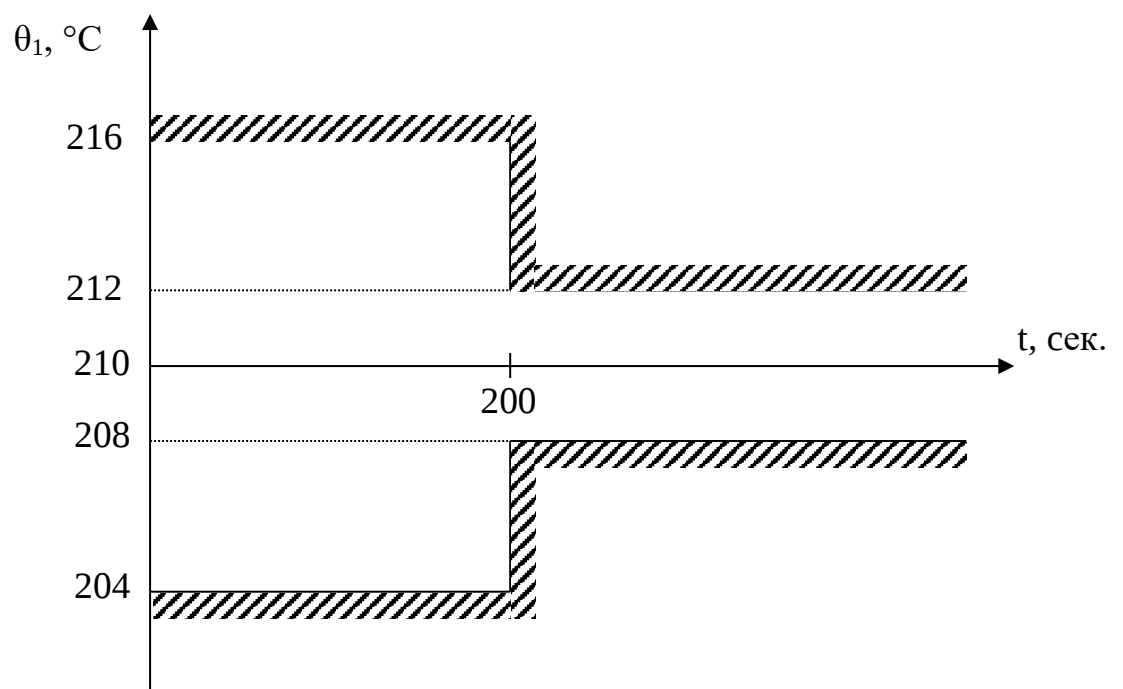


Рис. 1.4 – Регламентна зона для температури в першій зоні випічки

Як видно з регламентів на САР для процесу випічки хліба в тунельній печі особливо жорсткі вимоги пред'являються до короткочасних відхилень, так як саме недотримання цих регламентів може призвести до браку готової продукції і суттєвих економічних збитків. При цьому малі відхилення регламентуються не дуже жорстко.

Поточні значення нормативних параметрів завжди відрізняються від номінальних внаслідок зміни умов, у яких ведеться процес. Ці умови також характеризуються певними параметрами та можуть бути згруповані за певними ознаками.

Сировинні параметри характеризують властивості продукту, що йде на переробку. Для даного процесу до них відносять $W_{\text{тіс.заг}}$ (маса заготовки при вході в піч), $F_{\text{тіс.заг.}}$ (витрати заготовок), $M_{\text{тіс.заг.}}$ (вологість тістових заготовок).

Енергетичні параметри характеризують енергію, що підводить до технологічного обладнання зовні та витрачається на зміну властивостей продуктів. До цієї групи параметрів відносять $P_{\text{пар.}}$ (тиск пари), $F_{\text{пар.}}$ (витрати пари), $F_{\text{пов}}$ (витрати повітря).

Механічні параметри технологічного обладнання характеризують стан його робочих органів. До них віднесемо, U_1 (положення регулюючого органу подачі пари) і U_2 (положення регулюючого органу подачі газу).

1.3 Аналіз існуючих САК технологічного процесу випічки хліба

На всіх етапах випічки хліба для забезпечення його високої якості необхідно строго виконувати технологічний регламент випікання. Зокрема підтримувати задану температуру у зонах зволоження та випікання та температуру поверхні заготовки. Порухення регламенту може призводити до браку продукції та відповідно зниженню прибутку.

На хлібопекарських підприємствах досить часто в САР температурними режимами у зонах випічки хліба реалізують найпростіші позиційні алгоритми регулювання які реалізовано на релейних схемах. Ці системи забезпечують низьку динамічну та статичну точність. В умовах координатних збурень вони не дозволяють підтримувати параметри в границях регламенту. Це призводить до збільшення браку при випіканні хлібу. Технічне оновлення систем керування і використання типових ПІД регуляторів в рамках

мікропроцесорних контролерів підвищує статичну точність систем регулювання, але не вирішує повністю проблему низької динамічної точності регулювання температурних режимів в умовах дії координатних збурень.

Тому актуальна задача синтезу САР підвищеної динамічної точності яка дозволить вирішити задачу дотримання регламенту. Для цього потрібно вирішити ряд завдань починаючи з розробки моделей процесу випічки хлібу як об'єкта керування.

1.4 Комплекс математичних моделей ТП випічки хліба як об'єкту регулювання, їх реалізація в формі імітаційних моделей і результати тестування моделей

Для процесу випічки хліба в якості регульованих координат доцільно обрати температуру в зоні зволоження θ_{33} та температуру поверхні заготовки θ_1 . Всі інші входні дії, крім управляючої дії і контрольованого збурення, віднесемо до неконтрольованих збурень f_1 . Детерміновану складову цих збурень адитивно прикладемо до керуючих дій.

Структурна схема ОК є останнім етапом формалізації представлення ТА як ОК. Вона є найбільш загальною (концептуальною) моделлю ТА як ОК. Внутрішня частина структури ОК указує на те, що канали перетворення змінних мають певну самостійність по відношенню до його зовнішньої структури. Структурна схема процесу випічки хліба наведена на рис. 1.5.

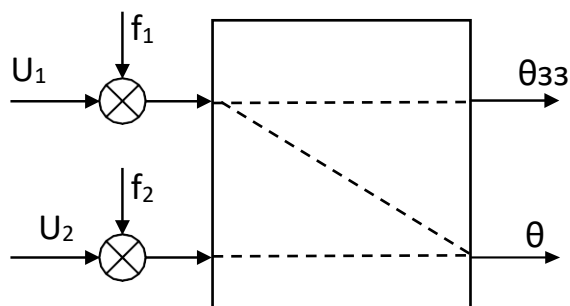


Рис. 1.5 – Структурна схема процесу випічки хліба як об'єкту регулювання

На рисунку:

θ_{33} - температура в зоні зволоження ;

θ_1 — температура в першій зоні випічки ;

U_1 — положення регулюючого органу, що регулює подачу пари в зону зволоження, %х.р.о.;

U_2 — положення регулюючого органу, що регулює подачу гарячого повітря у першу зону випічки, %х.р.о..

Ідентифікація моделей каналів перетворення об'єкта регулювання

Перед початком експериментів доцільно на основі апріорних даних, виходячи з фізичної суті об'єкту, попередньо оцінити властивості каналів, моделі яких підлягають ідентифікації.

Для технологічного процесу випічки хліба в тунельній печі за каналами управління ОК має властивість самовирівнювання, тому що розглядувані процеси є тепловими. Збільшення керуючих дій призведе до збільшення температур в камерах печі.

Виходячи з фізичної суті теплових процесів, що протікають в ОК, відомо, що відносно у повній мірі математично ці процеси можуть бути описані нелінійними диференційними рівняннями. Але також відомо, що номінальний режим функціонування ОК пов'язаний з порівняно вузьким діапазоном зміни температури як регульованої координати. А в такому діапазоні процеси можуть бути описані лінійними диференційними рівняннями, тобто припустимою є лінеаризація моделі ОК.

Результати активних експериментів наведені на рис. 1.6 та 1.7.

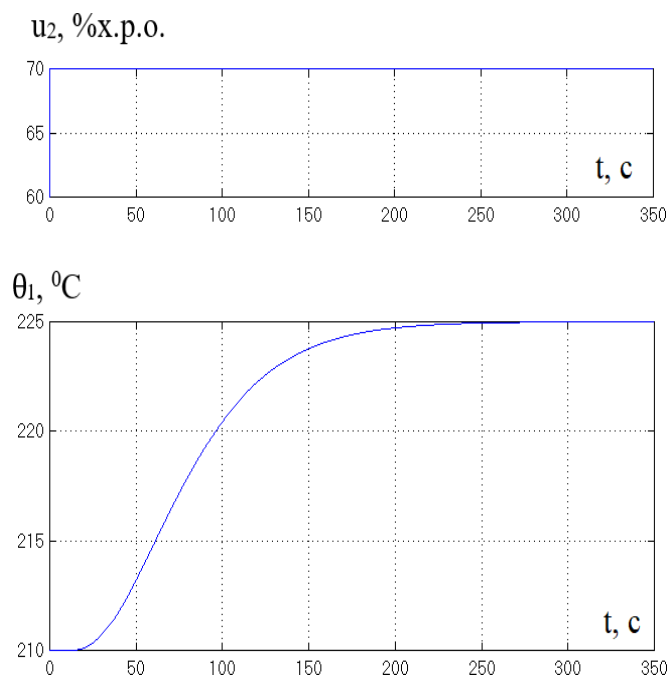


Рис. 1.6 – Результати активного експерименту за каналом ($U_2 - \theta_1$)

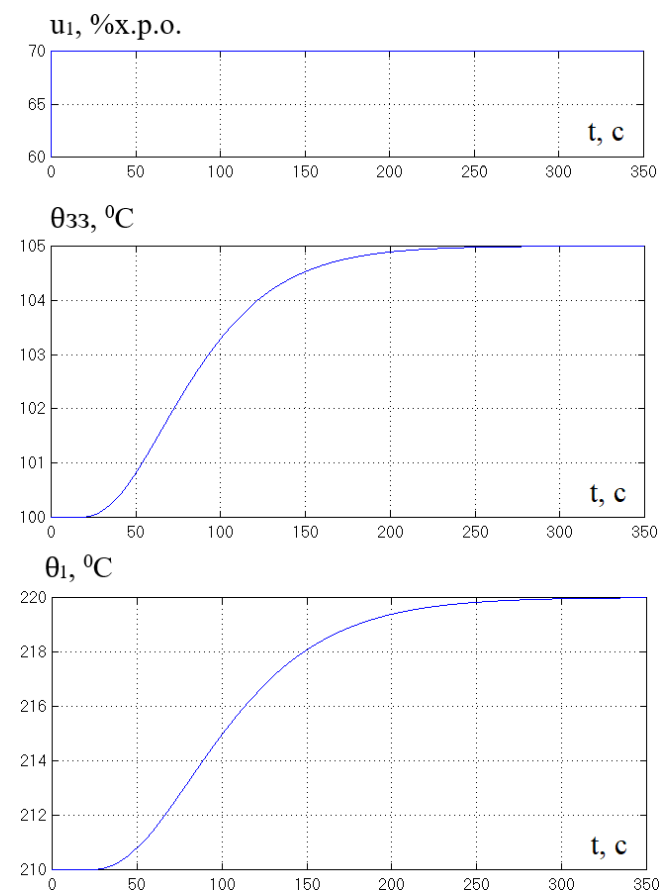


Рис. 1.7 – Результати активного експерименту за каналами ($U_1 - \theta_{33}$ та $U_1 - \theta_1$)

За результатами активного експерименту (рис. 2.1) можна зробити висновок, що канал управління нашого ОК має властивість самовирівнювання, а значить його модель може бути описана передаточними функціями: першого та другого порядків:

$$W_0(p) = \frac{K_0 \cdot e^{-\tau_0 p}}{T_0 p + 1}; \quad W_0(p) = \frac{K_0 \cdot e^{-\tau_0 p}}{(T_0 p + 1)^2}$$

Проведемо параметричну ідентифікацію моделей першого та другого порядків.

Для параметричної ідентифікації моделей ОК зі статичними властивостями необхідно знайти коефіцієнт передачі ОК (K_0), сталу часу (T_0) і час запізнення (τ_0).

Канал « $u_1 - \theta_{33}$ »

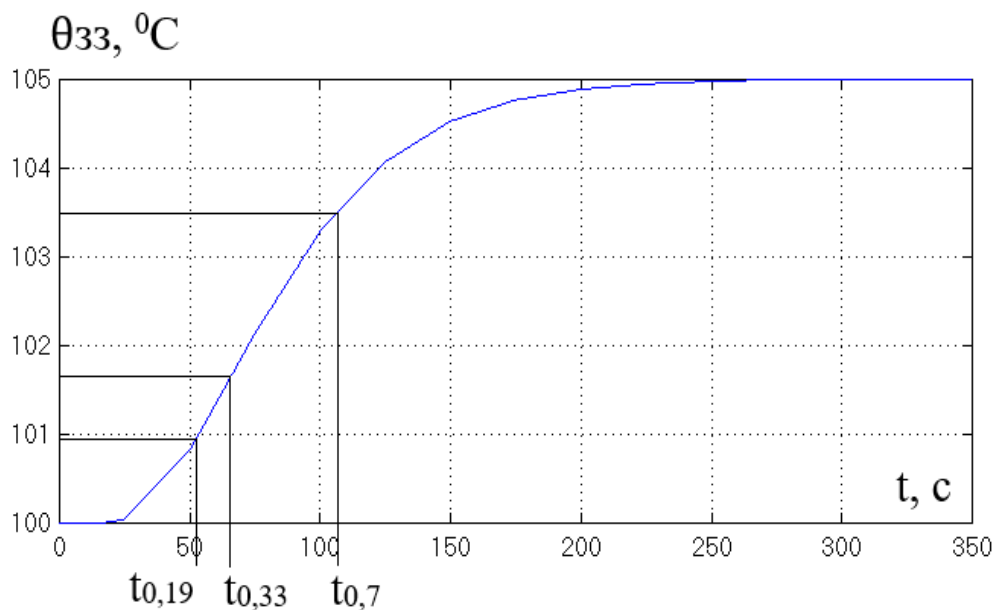


Рис. 1.8 – Параметрична ідентифікація моделі ОК за каналом « $U_1 - \theta_{33}$ »

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 65,5 - 106,5) = 45 \text{ c}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (106,5 - 45) / 1,2 = 51,3 \text{ c}$$

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_0(p) = \frac{0,5 e^{-45p}}{51,3p + 1}$$

Для моделі 2-го порядку

$$\theta_{33,0,19} = 0,19 \cdot 5 + 100 = 100,95 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,19} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 52,3 - 106,5) = 25,2 \text{ c}$$

$$T_o = (t_{0,7} - \tau_0)/2,4 = (106,5 - 25,2)/2,4 = 33,9 \text{ c}$$

Передаточна функція моделі 2-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_o(p) = \frac{0,5 e^{-25,2p}}{(33,9p + 1)^2}$$

Канал « $U_1 - \theta_1$ »

Коефіцієнт передачі ОК:

$$K_o = \frac{\Delta \theta_1}{\Delta U_1} = \frac{220 - 210}{70 - 60} = 1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{х. р. о.}}$$

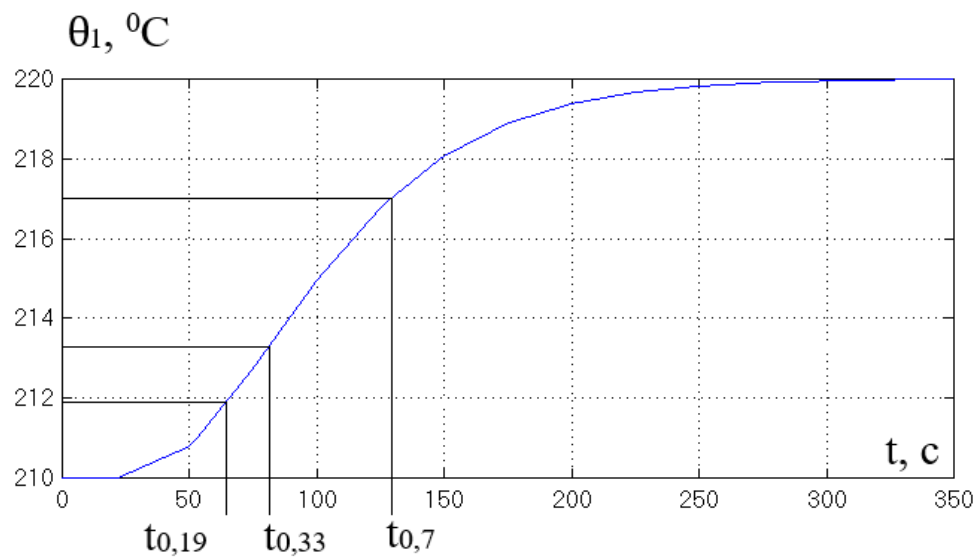


Рис. 1.9 – Параметрична ідентифікація моделі ОК за каналом « $u_1 - \theta_1$ »

Для ідентифікації сталої часу та часу запізнення як для моделі 1-го порядку, так і для моделі 2-го порядків доцільно використовувати методики «двох загальних точок».

Для моделі 1-го порядку

$$\Delta \theta_1 1,0 = 220 - 210 = 10 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$\theta_1 0,33 = 0,33 \cdot 10 + 210 = 213,3 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$\theta_{1,0,7} = 0,7 \cdot 10 + 210 = 217 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.9), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$.

$$t_{0,33} = 81 \text{ c}; t_{0,7} = 129,1 \text{ c}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 81 - 129,1) = 57 \text{ c}$$

$$T_o = (t_{0,7} - \tau_0)/1,2 = (129,1 - 57)/1,2 = 60,1 \text{ c}$$

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_o(p) = \frac{1,0 e^{-57p}}{60,1p + 1}$$

Для моделі 2-го порядку:

$$\theta_{1,0,19} = 0,19 \cdot 10 + 210 = 211,9 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.9), знаходимо $t_{0,19}$. $t_{0,19} = 64 \text{ c}$.

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,19} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 64 - 129,1) = 31,5 \text{ c}$$

$$T_o = (t_{0,7} - \tau_0)/2,4 = (129,1 - 31,5)/2,4 = 40,7 \text{ c}$$

Передаточна функція моделі 2-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_o(p) = \frac{1,0 e^{-31,5p}}{(40,7p + 1)^2}$$

Канал « $U_2 - \theta_1$ »

Коефіцієнт передачі ОК:

$$K_o = \frac{\Delta\theta_1}{\Delta U_2} = \frac{225 - 210}{70 - 60} = 1,5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{х. р. о.}}$$

Для ідентифікації сталої часу та часу запізнення як для моделі 1-го порядку, так і для моделі 2-го порядків також доцільно використовувати методики «двох загальних точок».

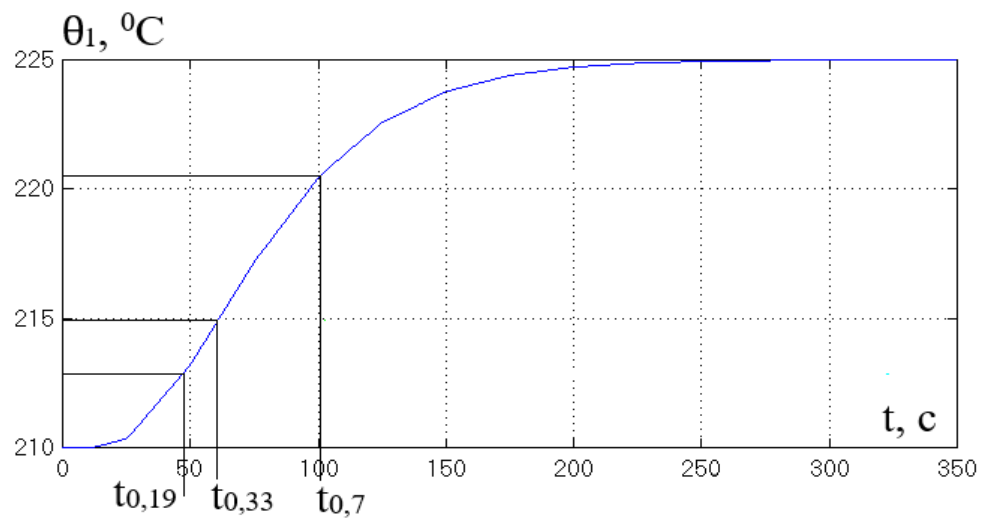


Рис. 1.10 – Параметрична ідентифікація моделі ОК за каналом « $u_2 - \theta_1$ »

Для моделі 1-го порядку

$$\Delta\theta_{1\ 1,0} = 225 - 210 = 15\ ^\circ\text{C};$$

$$\theta_{1\ 0,33} = 0,33 \cdot 15 + 210 = 214,95\ ^\circ\text{C};$$

$$\theta_{1\ 0,7} = 0,7 \cdot 15 + 210 = 220,5\ ^\circ\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.10), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$.

$$t_{0,33} = 60,8\ \text{с}; \quad t_{0,7} = 100,5\ \text{с}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 60,8 - 100,5) = 41\ \text{с}$$

$$T_o = (t_{0,7} - \tau_0)/1,2 = (100,5 - 41)/1,2 = 49,6\ \text{с}$$

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_o(p) = \frac{1,5 e^{-41p}}{49,6p + 1}$$

Для моделі 2-го порядку:

$$\theta_{1\ 0,19} = 0,19 \cdot 15 + 210 = 212,85\ ^\circ\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 1.10), знаходимо $t_{0,19}$. $t_{0,19} = 46,7$

с.

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,19} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 46,7 - 100,5) = 19,8\ \text{с}$$

$$T_o = (t_{0,7} - \tau_0)/2,4 = (100,5 - 19,8)/2,4 = 33,6\ \text{с}$$

Передаточна функція моделі 2-го порядку ОК буде мати вигляд:

$$W_o(p) = \frac{1,5 e^{-19,8p}}{(33,6p + 1)^2}$$

Для ідентифікації моделей статичних властивостей каналів ОК також було проведено ряд активних експериментів. Результати експериментів наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати розрахунку моделі статики

№ експерименту	u ₁ , %х.р.о.	u ₂ , %х.р.о.	θ _{зз} , °С	θ ₁ , °С	Моделі	
					θ _{зз} , °С	θ ₁ , °С
1	60	60	100	210	100	210
2	70	60	105	220	105	220
3	80	60	110	230	110	230
4	50	60	95	200	95	200
5	40	60	90	190	90	190
6	60	70	100	225	100	225
7	60	80	100	240	100	240
8	60	50	100	195	100	195
9	60	40	100	180	100	180

Отримана модель статичних властивостей у формі схеми моделювання наведена на рис. 1.11.

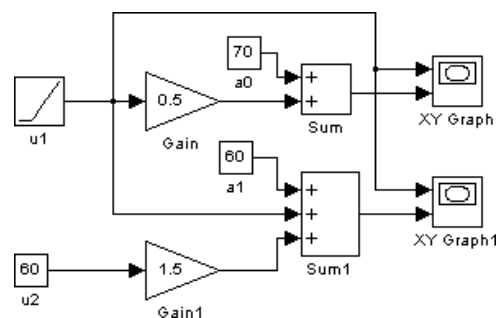


Рис. 1.11 – Схема моделювання ОК для відтворення моделей статики

Результати моделювання наведено на рис. 1.12.

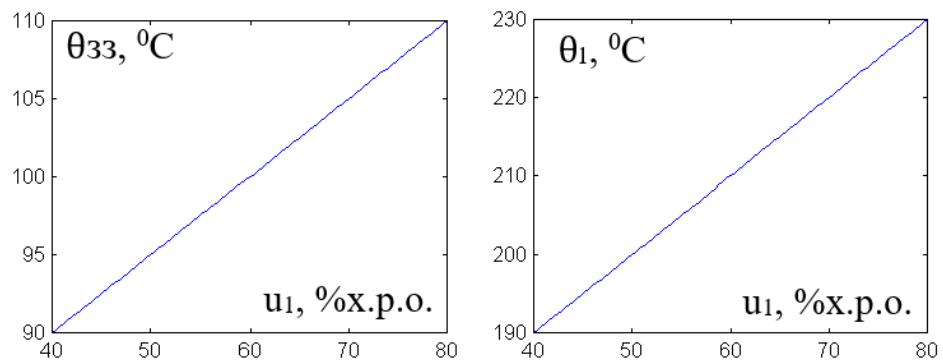


Рис. 1.12 – Результати розрахунку моделей статички

Загальна модель процесу випічки хлібу як об'єкта керування представлена на рисунку 1.7.

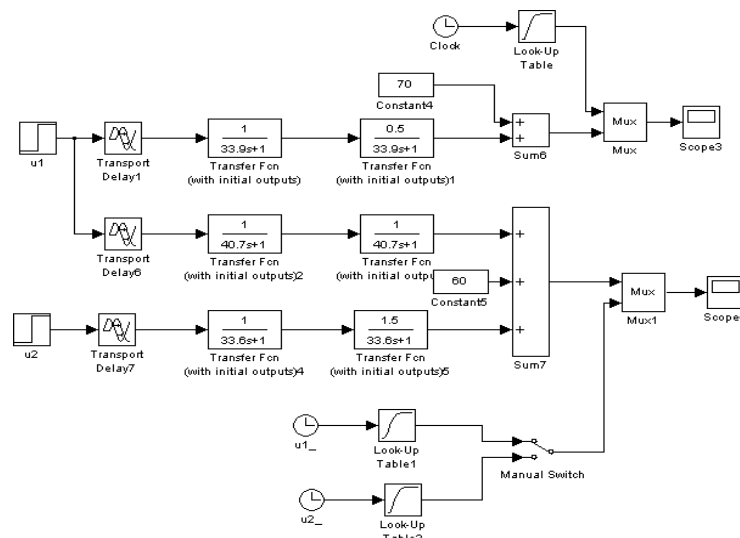


Рис. 1.13 – Структурна схема моделі об'єкта керування що реалізована засобами середовища MATLAB/Simulink

Така модель може використовуватися на етапі синтезу САР.

1.5 Типові структури і алгоритми САК ТП, що реалізують функції регулювання, результати їх параметричної оптимізації і перевірка на робастність (грубість)

Відповідно до нормативів ведення технологічного процесу (табл. 1.1) температура середовища в зоні зволоження θ_{33} має підтримуватися на рівні

100 °С з точністю $\pm 1^\circ\text{C}$. За цим параметром припустимі короточасні відхилення до $\pm 3^\circ\text{C}$ протягом часу не більше 200 секунд. Температура середовища в першій зоні випічки θ_1 має підтримуватися на рівні 210 °С з точністю $\pm 2^\circ\text{C}$. За цим параметром припустимі короточасні відхилення до $\pm 6^\circ\text{C}$ протягом часу не більше 200 секунд.

Як видно з регламентів на САР для процесу випічки хліба в тунельній печі особливо жорсткі вимоги пред'являються до короточасних відхилень, так як саме недотримання цих регламентів може призвести до браку готової продукції і суттєвих економічних збитків. При цьому малі відхилення регламентуються не дуже жорстко. Тому в якості інтегрального критерію застосуємо саме інтегральний квадратичний критерій, що штрафує великі відхилення:

$$J = \int_0^T [(\Delta \theta_{33}(t))^2 + 0.5 * (\Delta \theta_1(t))^2] dt$$

де, T – час моделювання;

$\Delta \theta_{33}(t)$, $\Delta \theta_1(t)$ – помилки регулювання температур.

Координатна схема процесу випічки хлібу наведена на рис. 1.5. У відповідності до замкненого принципу керування представимо схему САР базової (найпростішої) структури. Структурна схема САР матиме вигляд, наведений на рис. 1.14.

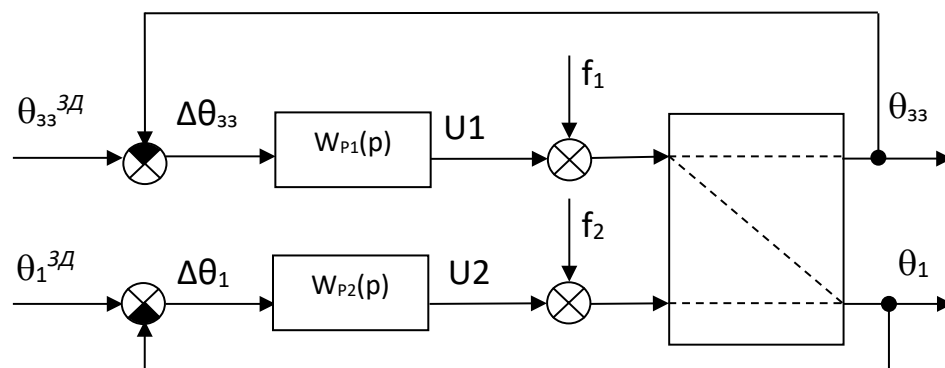


Рис. 1.14 – Структурна схема САР матиме вигляд

Позначення на схемі:

θ_{33} – температура в зоні зволоження, °C ;

θ_1 – температура в першій зоні випічки, °C ;

U_1 – положення регулюючого органу, що регулює подачу пари в першу зону, %х.р.о.;

U_2 – положення регулюючого органу, що регулює подачу гарячого повітря у першу зону випічки, %х.р.о.;

f_1 і f_2 – вектори неконтрольованих збурень;

$W_P(p)$ – передаточна функція регулятора температури;

$\theta_{33}^{3Д}$ – задане значення температури в зоні зволоження;

$\theta_{33}^{3Д}$ – задане значення температури в першій зоні випічки;

$\Delta\theta_1$ і $\Delta\theta_{33}$ – помилки регулювання.

Процес випічки хліба по всіх каналах володіє статичними властивостями якості альтернативних варіантів алгоритмів регулювання обираємо пропорційно-інтегральний (ПІ) і пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) алгоритми регулювання.

Передаточна функція ПІ-регулятора

$$W^P(p) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{I3}p} \right)$$

Передаточна функція ПІД-регулятора

$$W^P(p) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{I3}p} + \frac{T_{\text{уп}}p}{0,2 \cdot T_{\text{уп}}p + 1} \right)$$

Схеми моделювання САР з ПІ та ПІД – регуляторами наведені на рис.1.15 та 1.16.

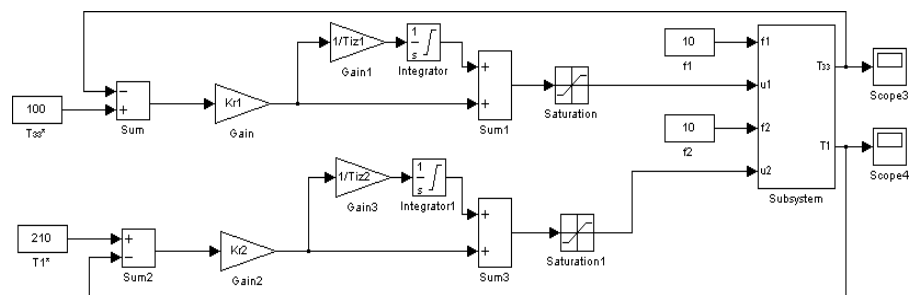


Рис 1.15 – Структурна схема моделювання САР з ПІ-регулятором

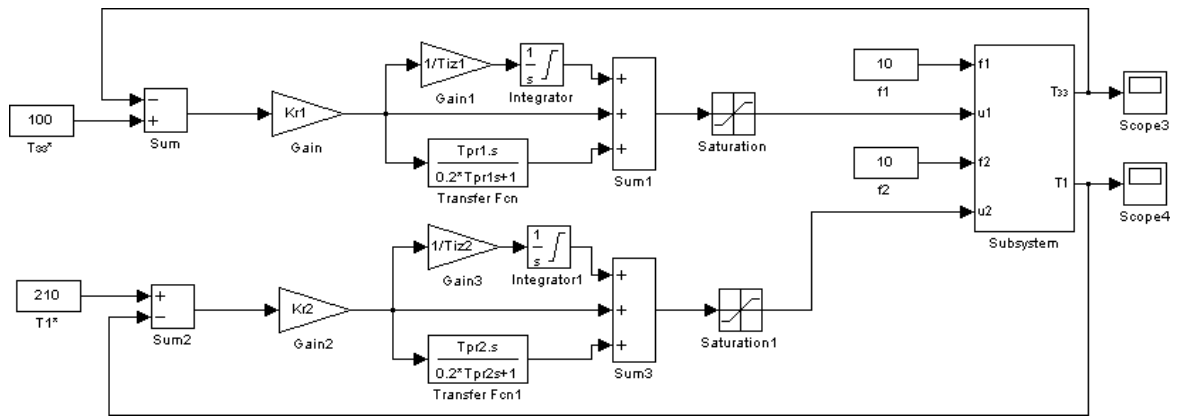


Рис. 1.16 – Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором

Вибір початкових наближень настроювальних параметрів алгоритмів регулювання на основі інженерних методик параметричного (неоптимального) синтезу САР.

Регулятор температури середовища в зоні пароволоження Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК:

$$W_o(p) = \frac{0,5 \cdot e^{-45p}}{51,3p + 1}$$

Розрахунок параметрів ПІ-регулятора:

$$K = \frac{1,1 \cdot T_e}{K_a \cdot r_a} = \frac{1,1 \cdot 51,3}{0,5 \cdot 45} = 2,51 \text{ \%х.р.о./}^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{ІІ}} = 2,0 \cdot r_a = 2,0 \cdot 45 = 90 \text{ с}$$

Розрахунок параметрів ПІД-регулятора:

$$K = \frac{1,2 \cdot T_e}{K_a \cdot r_a} = \frac{1,2 \cdot 51,3}{0,5 \cdot 45} = 2,74 \text{ \%х.р.о./}^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{ІІ}} = 1,4 \cdot r_a = 1,4 \cdot 45 = 63 \text{ с}$$

$$T_{\text{ДІ}} = 1,0 \cdot r_a = 1,0 \cdot 45 = 45 \text{ с}$$

Регулятор температури середовища в 1-й зоні випічки

Передаточна функція моделі 1-го порядку ОК:

$$W_o(p) = \frac{1,5 \cdot e^{-45p}}{49,6p + 1}$$

Розрахунок параметрів ПІ- регулятора:

$$K = \frac{1.1 \cdot T_p}{K_a \cdot r_d} = \frac{1.1 \cdot 49.6}{1.5 \cdot 41} = 0.89 \% \text{х.р.о./}^{\circ}\text{C}$$

$$T_D = 2.0 \cdot r_d = 2.0 \cdot 41 = 82 \text{ c}$$

Розрахунок параметрів ПІД- регулятора:

$$K = \frac{1.1 \cdot T_p}{K_a \cdot r_d} = \frac{1.1 \cdot 49.6}{1.5 \cdot 41} = 0.98 \% \text{х.р.о./}^{\circ}\text{C}$$

$$T_D = 1.4 \cdot r_d = 1.4 \cdot 41 = 57.4 \text{ c}$$

$$T_{PI} = 1.0 \cdot r_d = 1.0 \cdot 41 = 41 \text{ c}$$

Для оптимального параметричного синтезу САР температур в пекарній камері з ПІ-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання, наведену на рисунку 1.17. Результати оптимізації налаштувань ПІ-регулятора наведені на рис. 1.18.

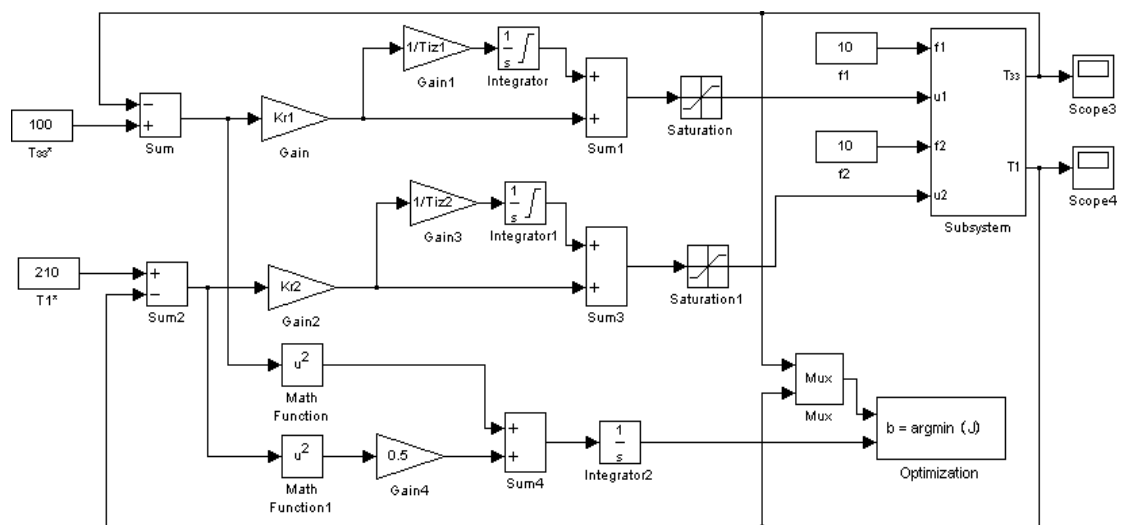
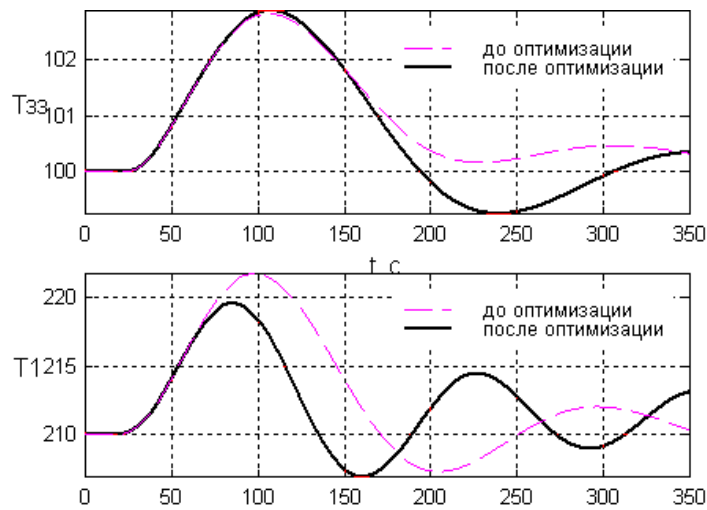


Рис.1.17 – Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІ- регулятора



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
Kr1	2.0605	0	2.51	20	до - 5213.8604
Tiz1	49.4206	1	90	300	после - 3430.6316
Kr2	2.0794	0	0.89	20	оптимизации.
Tiz2	208.9988	1	82	300	Количество шагов
					процедуры оптимизации
					максимальное - 1500
					фактическое - 229

Рис. 1.18 – Результати оптимізації налаштувань ПІ – регулятора

Порівняємо перехідні процеси в САР з ПІ-регулятором до і після оптимізації за інтегральним і прямими показниками якості. Результати порівняння зведені в таблиці.

Таблиця 1.3 – Результати порівняння прямих показників якості САР з ПІ – регулятором до і після оптимізації

САР з ПІ-регулятором	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta\theta_{33}^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп}1}, \text{с}$	$\Delta\theta_{1\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп}2}, \text{с}$	
до оптимізації	2,8	173,9	11,7	159,4	5214
після оптимізації	2,9	168,6	9,6	256,3	3431

Порівняльний аналіз перехідних процесів за критерієм оптимальності та показниками, для яких встановлені гранично-допустимі значення.

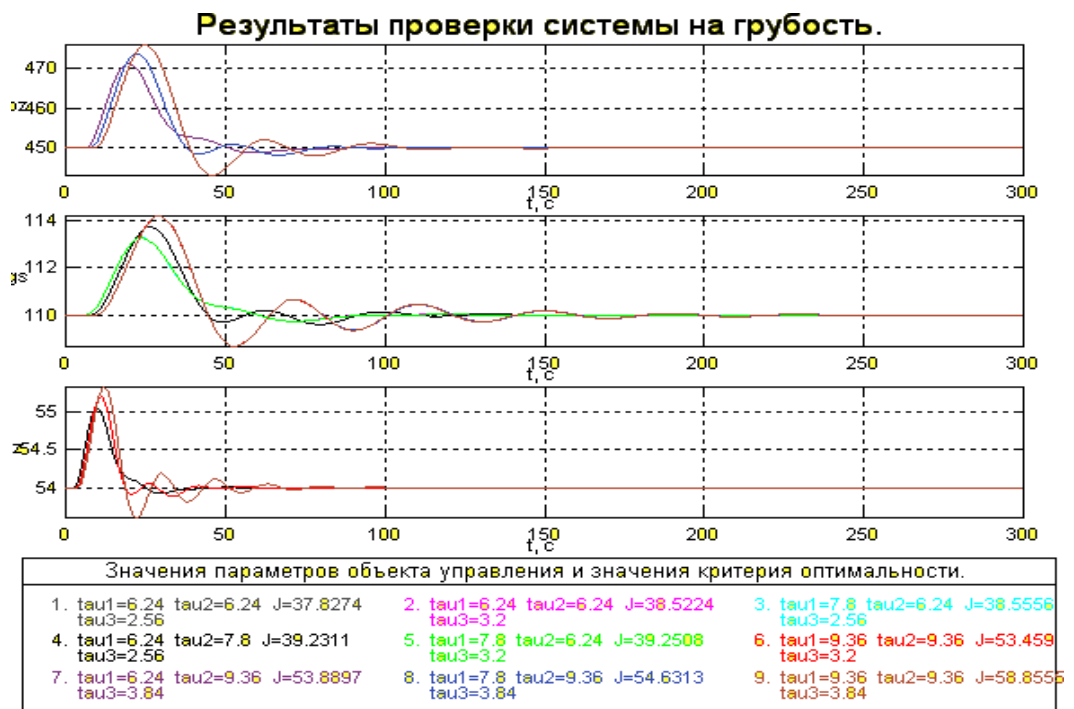


Рис. 1.19 - Аналіз на грубість САР з ПД-регулятором в умови дії детермінованих неконтрольованих збурень

Синтез і аналіз САР підвищеної динамічної точності.

В основу підвищення динамічної точності САР буде покладено принцип двоканальний Петрова, сутність якого у введенні додаткового каналу впливу через коригувальну зв'язок. Відповідно до принципу інваріантності Петрова структурна схема САР матиме вигляд, наведений на рис. 1.20.

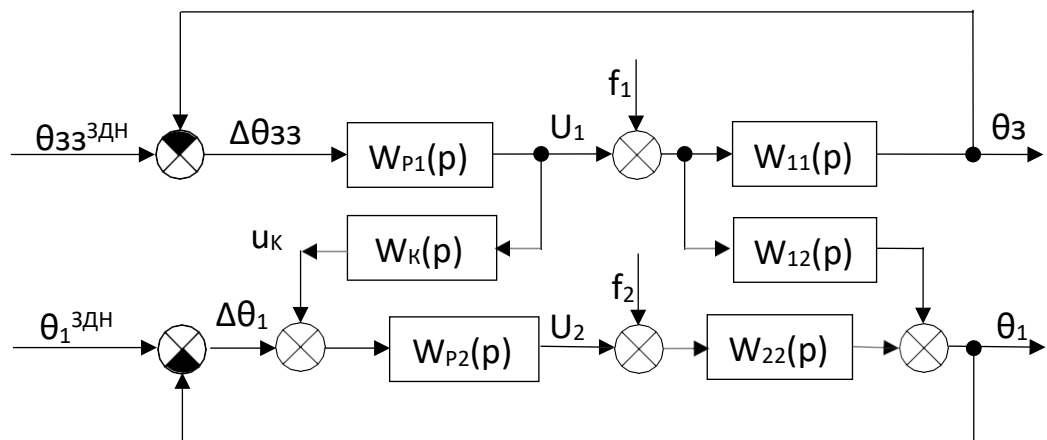


Рис. 1.20 – Структурна схема САР відповідно з автономним принципом управління

Позначення на схемі:

u_K – коригуюча керуюча дія, 0C ;

$W_K(p)$ – передаточна функція коригуючого зв'язку;

$W_{11}(p)$, $W_{12}(p)$, $W_{22}(p)$ – передаточні функції моделі ОК.

Необхідною умовою реалізації САР є фізична можливість організації додаткового каналу впливу за контрольованим збуренням, а для розглянутої САР така можливість є. Достатньою умовою реалізації САР є фізична реалізація передаточної функції коригуючого зв'язку.

$$W_{12}^K(p) = - \frac{W_{12}^o(p)}{W_{22}^o(p) * W_2^p(p)}$$

$$W_{11}(p) = \frac{k_{11} \cdot e^{-\tau_{11}p}}{T_{11}p + 1}; \quad W_{22}(p) = \frac{k_{22} \cdot e^{-\tau_{22}p}}{T_{22}p + 1};$$

$$W_{F1}(p) = k_{F1} \cdot (1 + \frac{1}{T_{11}p} + T_{11}p) = k_{F1} \cdot \frac{T_{11} \cdot T_{11} \cdot p^2 + T_{11}p + 1}{T_{11}p}$$

$$W_K(p) = - \frac{W_{12}(p)}{W_{F1}(p) \cdot W_{22}(p)} = - \frac{\frac{k_{12} \cdot e^{-\tau_{12}p}}{T_{12}p + 1}}{k_{F1} \cdot \frac{T_{11} \cdot T_{11} \cdot p^2 + T_{11}p + 1}{T_{11}p} \cdot \frac{k_{22} \cdot e^{-\tau_{22}p}}{T_{22}p + 1}}$$

$$= - \frac{k_{12}}{k_{F1} \cdot k_{22}} \cdot e^{-(\tau_{12} + \tau_{22})p} \cdot \frac{T_{12}p + 1}{(T_{11} \cdot T_{11} \cdot p^2 + T_{11}p + 1) \cdot T_{11}p \cdot (T_{22}p + 1)}$$

$$= - \frac{k_{12}}{k_{F1} \cdot k_{22}} \cdot e^{-(\tau_{12} + \tau_{22})p} \times$$

$$\times \frac{T_{11}p \cdot (T_{11}p + 1)}{(T_{11} \cdot T_{11} \cdot p^2 + T_{11}p + 1) \cdot (T_{12}p + 1)}$$

$$\text{РАСЧЕТЫ: } W_{12}^o(p) = \frac{-1.0}{60.1p + 1}; \quad W_{22}^o(p) = \frac{1.8 \cdot e^{-41p}}{49.6p + 1}$$

$$W_{F1}(p) = 2.06 \cdot (1 + \frac{1}{64.1p} + 23.8p)$$

тоді передаточна функція коригуючого зв'язку набуде вигляду:

$$W_K(p) = - \frac{1.0}{2.06 \cdot 1.8} \cdot e^{-(37+41)p} \cdot \frac{64.1p(49.6p+1)}{(64.1 \cdot 23.8p^2 + 64.1p + 1) \cdot (60.1p + 1)} = -0.32 \cdot$$

$$e^{-16p} \cdot \frac{64.1p(49.6p+1)}{(1526p^2 + 64.1p + 1) \cdot (60.1p + 1)}$$

Вивід передавальних функцій коригувальних зв'язків, аналіз їх структури з умов фізичної можливості бути реалізованим, приведення до

фізично реалізується увазі, подання до формі з'єднання типових динамічних ланок та отримання перехідних характеристик.

Структурна схема моделювання передавальної функції корегуючого зв'язку ($W_{12}^K(p)$) приведена на рис. 1.21 а її перехідна характеристика - на рис. 1.22.

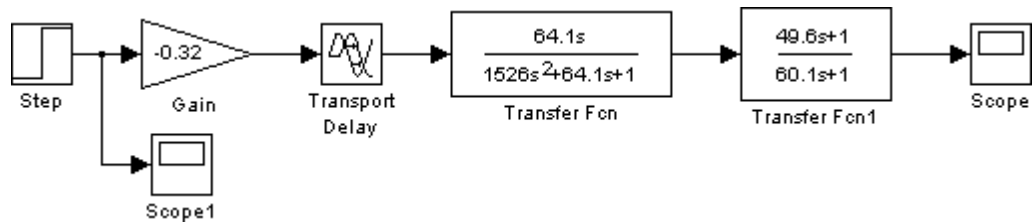


Рис. 1.21 – Структурна схема моделювання

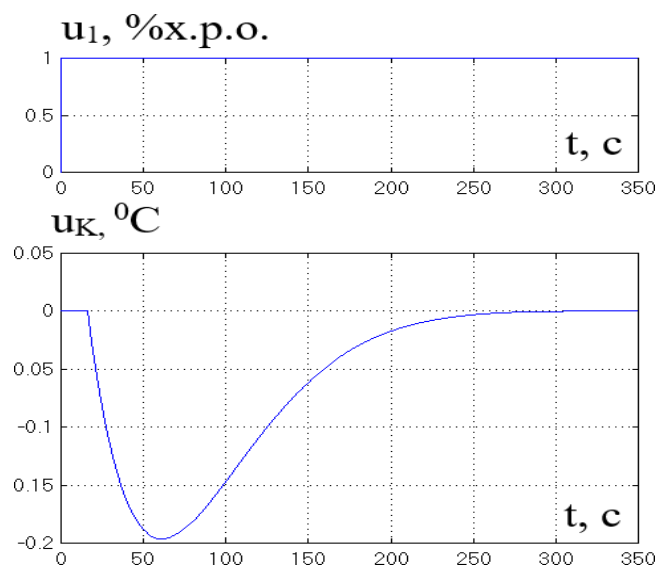


Рис. 1.22 – Перехідна характеристика

Структурна схема моделювання для отримання спрощеного фізично реалізованого варіанту $W_K(p)$ приведена на рис. 1.23 а результати налаштування та її перехідна характеристика – на рис. 1.24.

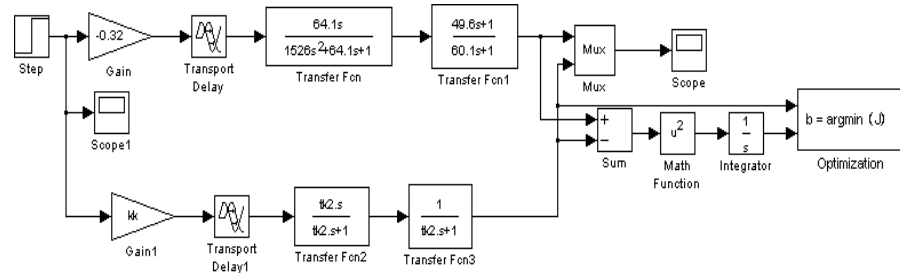


Рис. 1.23 – Структурна схема моделювання

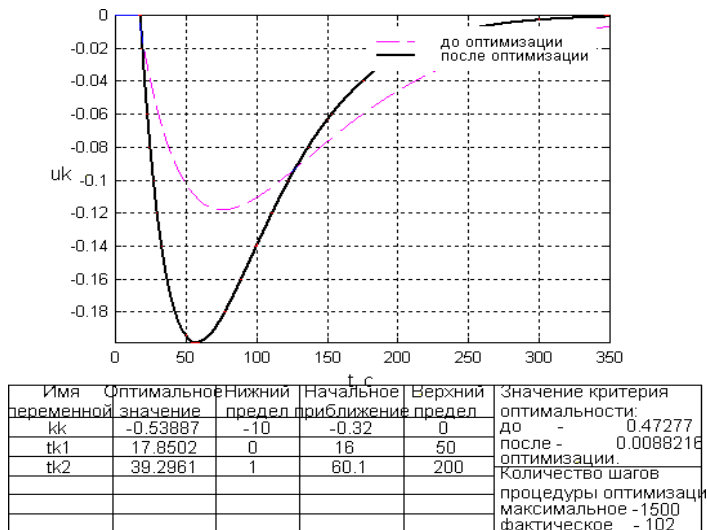


Рис. 1.24 – Результаты наладки параметров простого варианта
корректирующей связи

Вибір початкових наближень параметрів спрощених коригувальних зв'язків з умов близькості перехідних характеристик коригувальних зв'язків до і після їх спрощення (можливе застосування будь-яких методів як оптимізаційних, так і звичайних).

Проведемо оптимальний параметричний синтез САР автономним принципом управління. Схема моделювання САР наведена на рис. 1.25.

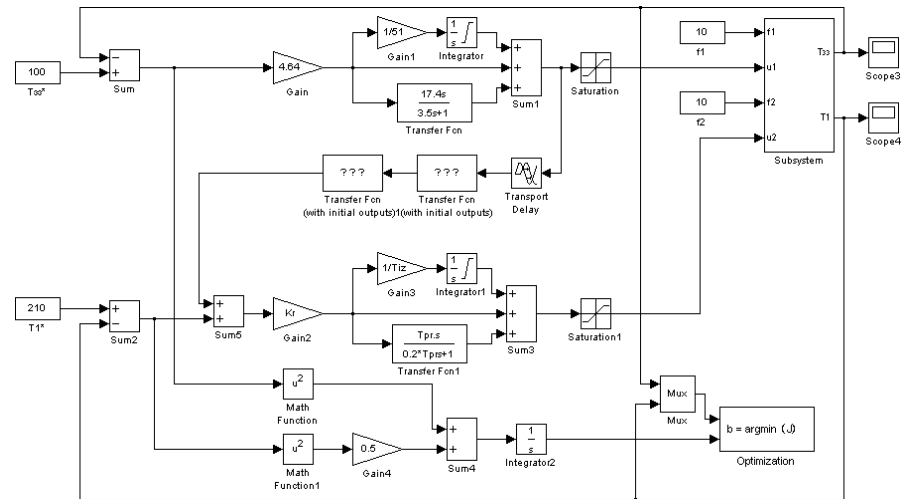


Рис. 1.25 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу корегуючого зв'язку

Оптимальний параметричний синтез будемо проводити тільки для параметрів коригуючого зв'язку. Результати оптимізації наведено на рис. 1.26.

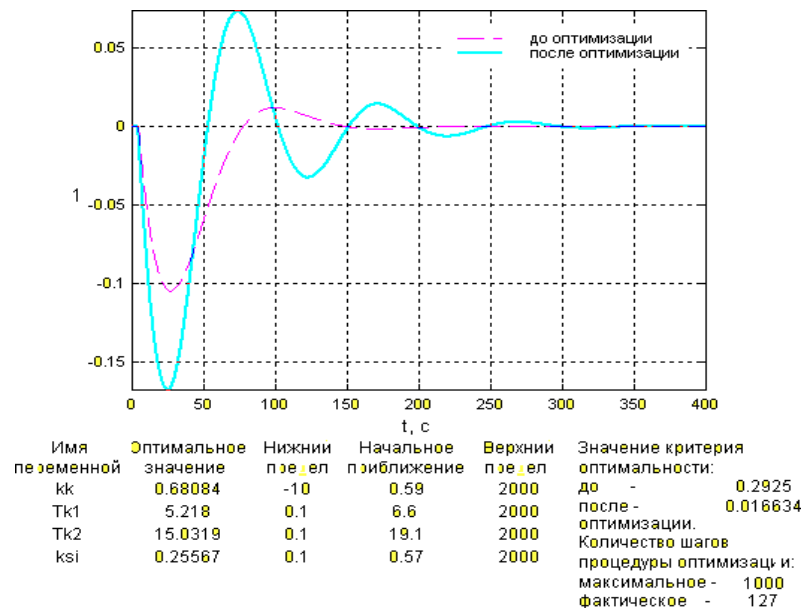


Рис. 1.26 – Результати оптимізації параметрів корегуючого зв'язку

Результати перевірки САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОК наведено на рис. 1.27. Як видно з результатів оцінки САР на грубість, в умовах варіації параметрів ОК САР дає перехідні процеси, що розходяться, а значить, САР є негрубою.

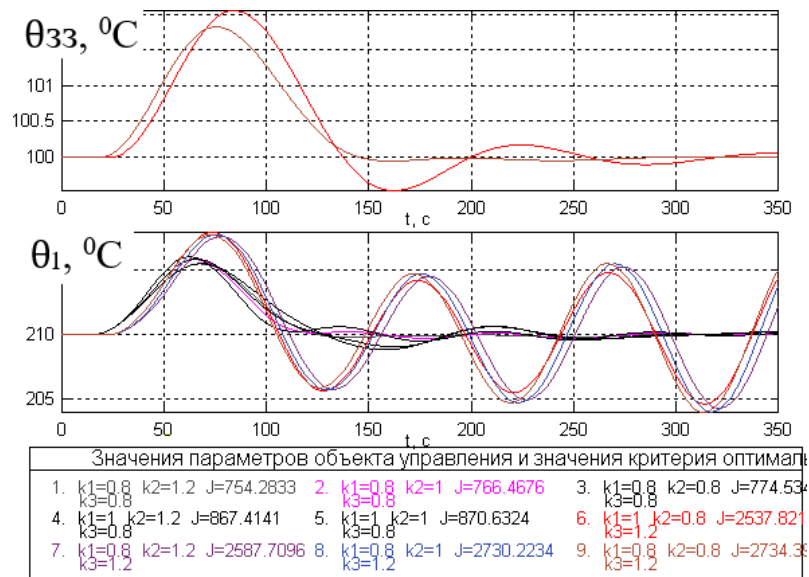


Рис. 1.27 – Результати перевірки САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОК

Для порівняння якості роботи САР базової структури і підвищеної динамічної точності розроблена структурна схема моделювання, наведена на рис. 1.28. Внутрішні структури підсистем наведено на рис. 1.29 та 1.30.

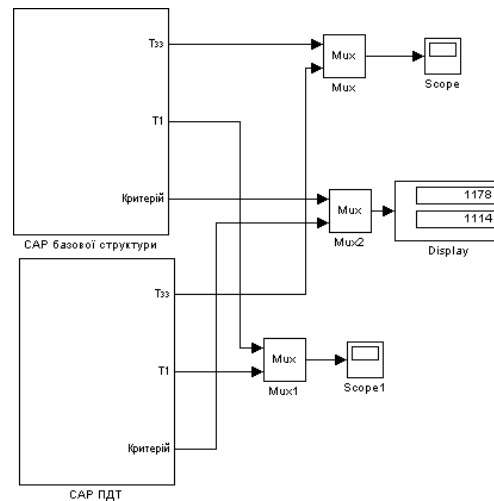


Рис. 1.28 – Структурна схема моделювання для порівняння якості роботи САР базової структури та САР підвищеної динамічної точності

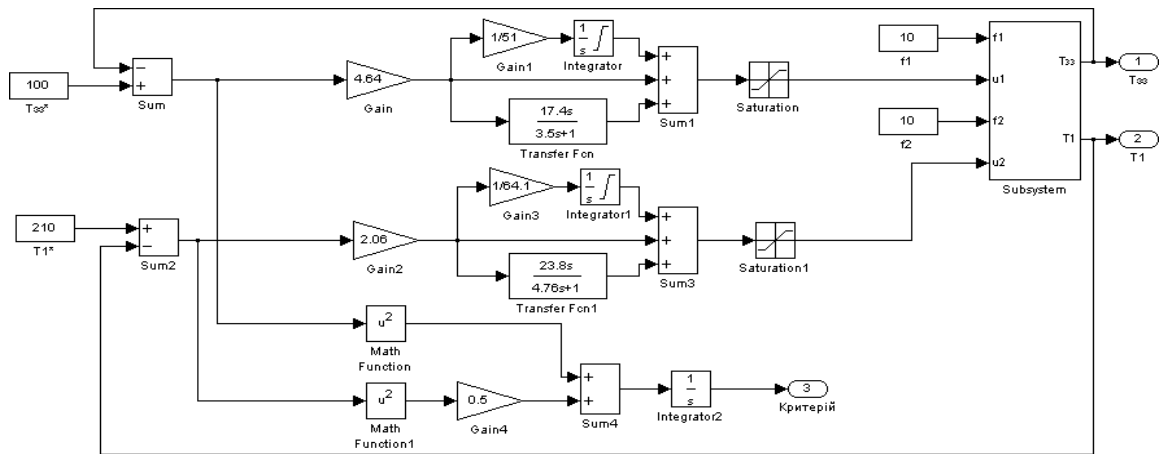


Рис.1.29 – Структурна схема моделювання САР базової структури

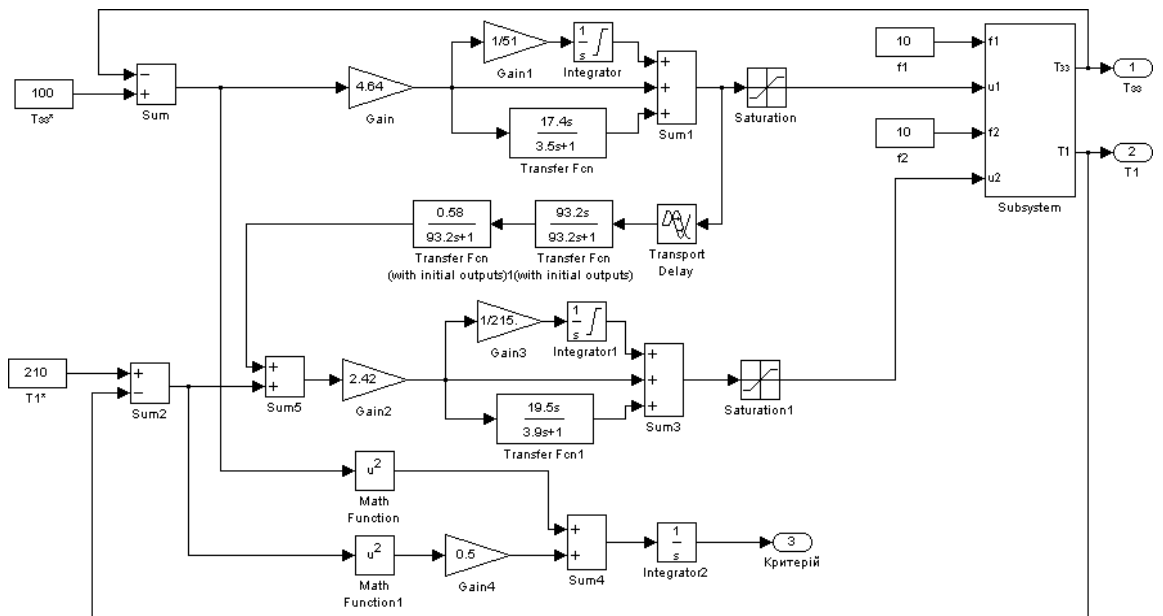


Рис. 1.30 – Структурна схема моделювання САР підвищеної динамічної точності

Таблиця 1.4 – Результати порівняння прямих показників якості САР базової структури та автономної

Варіант САР	Прямі показники якості				Критерій
	$\Delta\theta_{33}^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп}1}, \text{с}$	$\Delta\theta1^{\text{МАКС}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп}2}, \text{с}$	
Базової структури	2,1	116,2	7	171,1	1178
Автономна	2,1	116,2	6,8	99,4	1114

Результати порівняння наведені на рис. 1.31

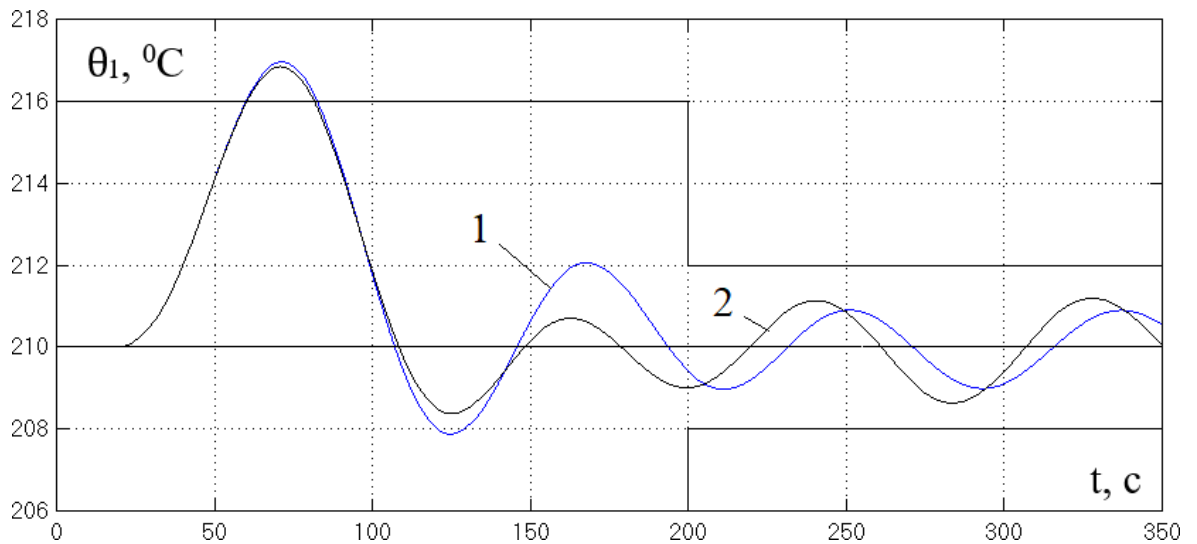


Рис. 1.31 – Результати порівняння якості роботи САР базової структури (1) і САР підвищеної динамічної точності (2)

САР підвищеної динамічної точності задовольняє гранично припустимим вимогам за θ_{zz} і не задовольняє за θ_1 . Після підвищення динамічної точності САР інтегральний критерій зменшився на 5%, максимальне динамічне відхилення за θ_{zz} не змінилося, а за θ_1 зменшилося на 3%, час перехідного процесу за θ_{zz} не змінився, а за θ_1 зменшився на 42%.

САР підвищеної динамічної точності є грубою за θ_{zz} і негрубою за θ_1 .

Оскільки для САР підвищення динамічної точності дає певне покращення показників якості регулювання за θ_1 у порівнянні з САР базової структури, тому САР підвищеної динамічної точності використовувати доцільно.

1.6 Недоліки відомих САК ТП випічки хліба, обґрунтування напрямків удосконалення САК як нових джерел підвищення економічної ефективності технологічного процесу

Причиною недостатньої точності САР можуть бути зовнішні умови: дія інтенсивних контрольованих і неконтрольованих збурень, інтенсивна зміна

завдання САР, а також внутрішні особливості ОК і САР (значне співвідношення τ_o/T_o , взаємний вплив каналів у багатовимірній САР).

Розглянуті вище в п.п. 1.5 системи регулювання забезпечують досить високу статичну точність але динамічна точність за каналом регулювання температури у першій зоні випічки не забезпечується належним чином і є порушення встановленого технологічного регламенту. До того ж цей контур регулювання температури має малий запас стійкості і система є не грубою. При впровадженні на виробництві система може стати не стійкою та не працездатною, а це призведе до підвищення браку продукції. Тому актуально реалізувати алгоритми регулювання, що забезпечать підвищення динамічної точності регулювання та одночасно необхідний запас стійкості контуру регулювання.

У нашому випадку головною причиною недостатньої динамічної точності САР температури у першій зоні випічки є запізнення в об'єкті регулювання. Основним шляхом підвищення динамічної точності саме даної САР являється побудова САР з компенсацією запізнення в контурі регулювання.

1.7 Висновки за розділом

Виходячи з вищевказаних обґрунтувань доцільно доопрацювати математичну модель ОК та розробити САР з компенсацією запізнення в контурі регулювання.

РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП ВИПІЧКИ ХЛІБА

2.1 Специфічні особливості ОР і обґрунтування вибору методів корекції САР для підвищення їх динамічної точності

Детально проаналізувавши вибраний об'єкт регулювання, можна зробити висновок, що за каналом регулювання «U2- θ_1 » він має значне співвідношення τ_o/T_o . Велике співвідношення τ_o/T_o знижує динамічну точність та запас стійкості САР.

Запізнення являється головною перешкодою підвищення динамічної точності системи і забезпечення її стійкості особливо для істотно нестационарних об'єктів (k , T , τ – істотно змінюються). Для підвищення динамічної точності системи і забезпечення її стійкості розглядається шлях компенсації дії запізнення на динаміку власного руху системи. З цією ціллю в САР температури у першій зоні випічки θ_1 додається додатковий коригуючий зв'язок.

2.2 Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності

Для реалізації САР з компенсацією запізнення у власному русі в якості базової будемо використовувати раніше розроблену автономну систему регулювання. Структурна схема САР з компенсацією запізнення в контурі регулювання матиме вигляд, наведений на рис. 1.18.

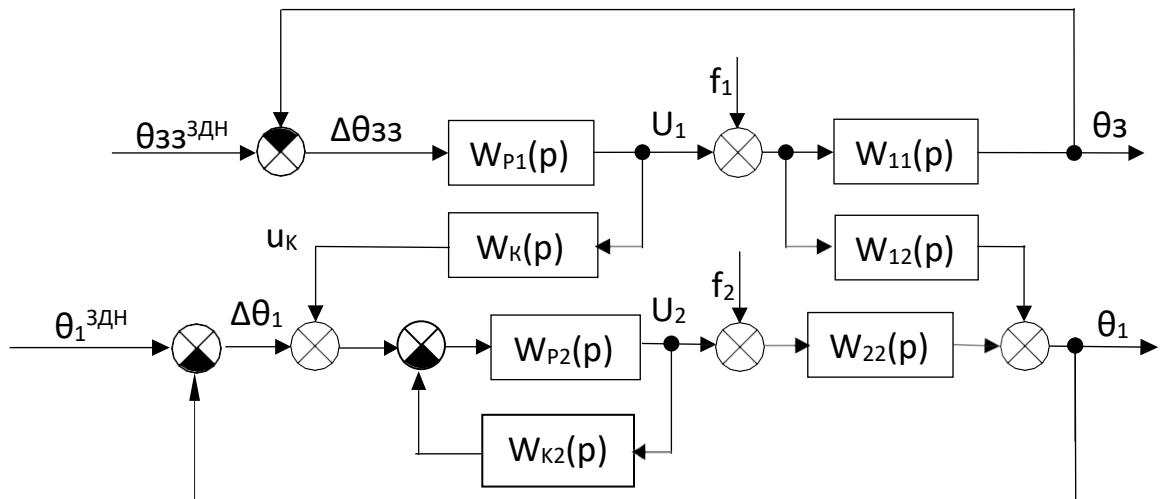


Рис. 2.1 – Структурна схема САР підвищеної динамічної точності

Позначення на схемі:

$\theta_{зз}$ – температура в зоні зволоження, °С ;

θ_1 – температура в першій зоні випічки, °С ;

u_k – коригуюча керуюча дія, °С;

U_1 – положення регулюючого органу, що регулює подачу пари в першу зону, %х.р.о.;

U_2 – положення регулюючого органу, що регулює подачу гарячого повітря у першу зону випічки, %х.р.о.;

f_1 і f_2 – вектори неконтрольованих збурень;

$W_k(p)$ – передаточна функція коригуючого зв'язку що забезпечує автономність;

$W_{k2}(p)$ – передаточна функція коригуючого зв'язку що забезпечує компенсацію запізнення на динаміку власного руху системи;

$W_{11}(p)$, $W_{12}(p)$, $W_{22}(p)$ – передаточні функції моделі ОК.

$W_p(p)$ – передаточна функція регулятора температури;

$\theta_{зз}^{3Д}$ – задане значення температури в зоні зволоження;

$\theta_{зз}^{3Д}$ – задане значення температури в першій зоні випічки;

Запізнення ОК не буде впливати на власний рух САР, якщо його передаточна функція не входить до власного оператора системи $Q^C(p)$.

Напишемо передаточної функції «звичайної» САР (без коригуючого зв'язку) та САР з коригуючим зв'язком за каналом неконтрольованого збурення.

$$W_{f2-\theta1}^{co}(p) = \frac{W_{U2-\theta1}(p)}{1+W_P(p) \cdot W_{f2-\theta1}(p)} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} W_{f2-\theta1}^{ck}(p) &= \frac{W_O(p)}{1 + \frac{W_P(p)}{1 + W_P(p) \cdot W_K(p)} \cdot W_O(p)} = \\ &= \frac{W_O(p)}{\frac{1 + W_P(p) \cdot W_K(p) + W_P(p) \cdot W_O(p)}{1 + W_P(p) \cdot W_K(p)}} = \\ &= \frac{W_O(p) \cdot (1 + W_P(p) \cdot W_K(p))}{1 + W_P(p) \cdot W_K(p) + W_P(p) \cdot W_O(p)} \end{aligned}$$

Передаточні функції власних операторів систем:

$$Q^{co}(p) = 1 + W_P(p) \cdot W_O(p)$$

$$Q^{ck}(p) = 1 + W_P(p) \cdot W_K(p) + W_P(p) \cdot W_O(p)$$

В передаточних функціях власних операторів систем напишемо передаточну функцію ОК у вигляді добутку передаточної функції ОК, з якої виключено ланку запізнення $W_O'(p)$, та передаточної функції ланки запізнення $e^{-\tau_{op}}$: $W_O(p) = W_O'(p) \cdot e^{-\tau_{op}}$.

$$Q^{c3}(p) = 1 + W_P(p) \cdot W_O'(p) \cdot e^{-\tau_{op}}$$

$$Q^{ck}(p) = 1 + W_P(p) \cdot W_K(p) + W_P(p) \cdot W_O'(p) \cdot e^{-\tau_{op}}$$

Для забезпечення незалежності власного руху САР від запізнення ОК необхідно, щоб це запізнення не входило до власного оператора системи. Для цього достатньо, щоб власний оператор САР з коригуючим зв'язком дорівнював би власному оператору звичайної САР з ОК без запізнення. Тобто:

$$Q^{ck}(p)|_{\tau_{op}>0} = Q^{c3}(p)|_{\tau_{op}=0}$$

Звідси:

$$1 + W_P(p) \cdot W_K(p) + W_P(p) \cdot W_O'(p) \cdot e^{-\tau_{op}} = 1 + W_P(p) \cdot W_O'(p)$$

$$W_P(p) \cdot W_K(p) = 1 + W_P(p) \cdot W_O'(p) - 1 - W_P(p) \cdot W_O'(p) \cdot e^{-\tau_{op}}$$

$$W_P(p) \cdot W_K(p) = W_P(p) \cdot W_O'(p) - W_P(p) \cdot W_O'(p) \cdot e^{-\tau_{op}}$$

$$W_K(p) = W_O'(p) - W_O'(p) \cdot e^{-\tau_{op}} = (1 - e^{-\tau_{uy}p}) \cdot W_O'(p)$$

Конкретизуємо передаточну функція коригуючого зв'язку для випадку, коли ОК має статичні властивості, тобто

$$W_o(p) = \frac{k_0 \cdot e^{-\tau_0 p}}{T_0 p + 1}$$

Проведемо підстановку, отримаємо:

$$W_K(p) = (1 - e^{-\tau_0 p}) \cdot \frac{k_0}{T_0 p + 1}$$

Оскільки: $W_o(p) = \frac{1,5 \cdot e^{-41p}}{49,6p + 1}$, тоді передаточна функція коригуючого зв'язку набуде вигляду:

$$W_{K2}(p) = (1 - e^{-41p}) \cdot \frac{1,5}{49,6p + 1}$$

Конкретна передаточна функція коригуючого зв'язку не містить фізично нереалізовуваних ланок, тобто є фізично реалізовуваною.

Структурна схема моделювання передаточної функції коригуючого зв'язку наведена на рис. 2.2, а її перехідна характеристика – на рис. 2.3.

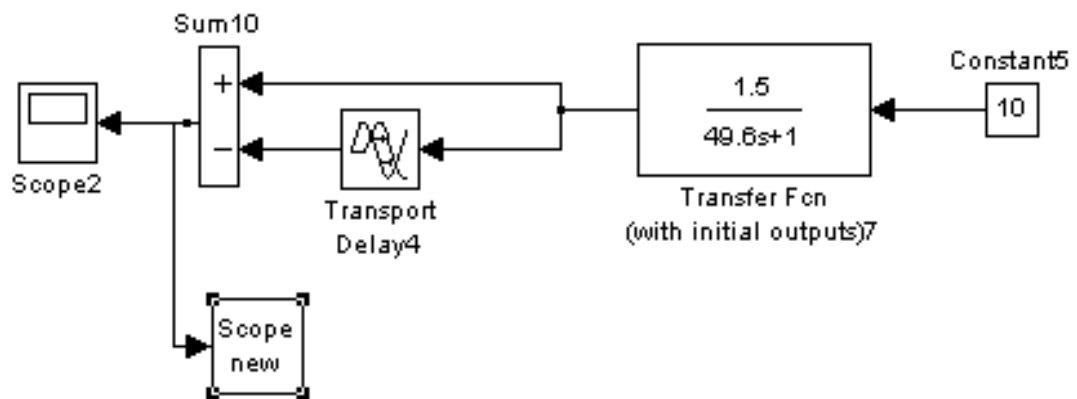


Рис. 2.2 – Структурна схема моделювання передаточної функції коригуючого зв'язку

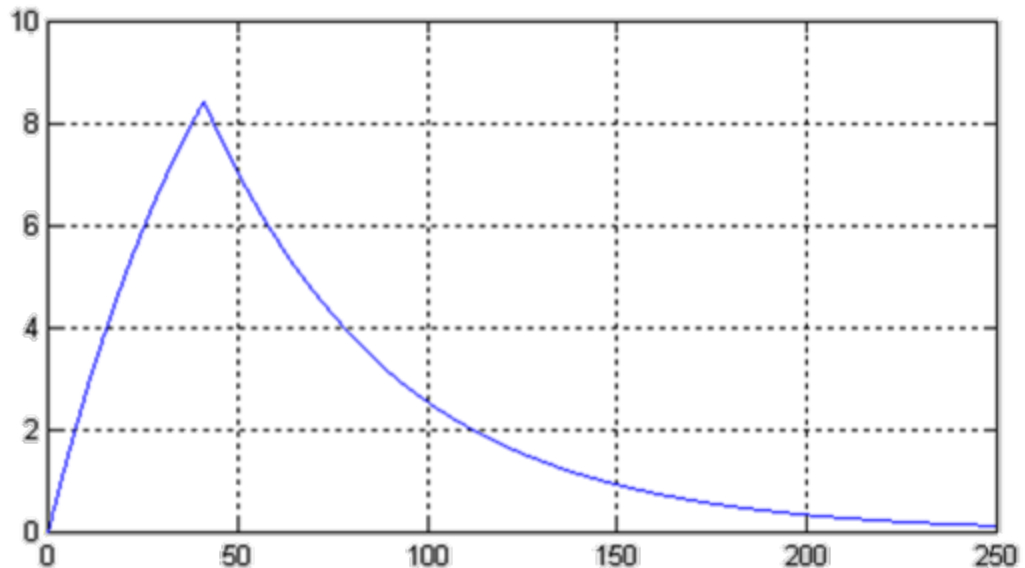


Рис. 2.3 – Перехідна характеристика коригуючого зв'язку

Отримана передаточна функція коригуючого зв'язку представлена ланками запізнення та статичною аперіодичною першого порядку. Така передаточна функція коригуючого зв'язку спрощення не потребує.

Для оптимального параметричного синтезу САР будемо використовувати наступний вигляд передаточної функції коригуючого зв'язку: $W_K(p) = (1 - e^{-T_{K1}p}) \cdot \frac{K_K}{T_{K2}p + 1}$.

В якості початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку приймемо такі значення параметрів: $K_K = 1,5$; $T_{K1} = 41$; $T_{K2} = 49,6$.

При проведенні налаштування САР параметри коригуючих зв'язку будемо оптимізувати сумісно з параметрами регулятора для забезпечення підвищення динамічної точності. В якості інтегрального критерію застосуємо як і раніше інтегральний квадратичний критерій але спростимо його до одної змінної.

$$J = \int_0^{t_M} [(\Delta\theta_1(t))^2] \cdot dt$$

де t_M – час моделювання;

$\Delta\theta_1(t)$ – похибка регулювання температури у першій зоні випічки.

2.3 Оптимальний параметричний синтез САР базової структури та аналіз результатів синтезу

На рис. 2.4 наведена схема моделювання САР базової структури з оптимальними параметрами регуляторів.

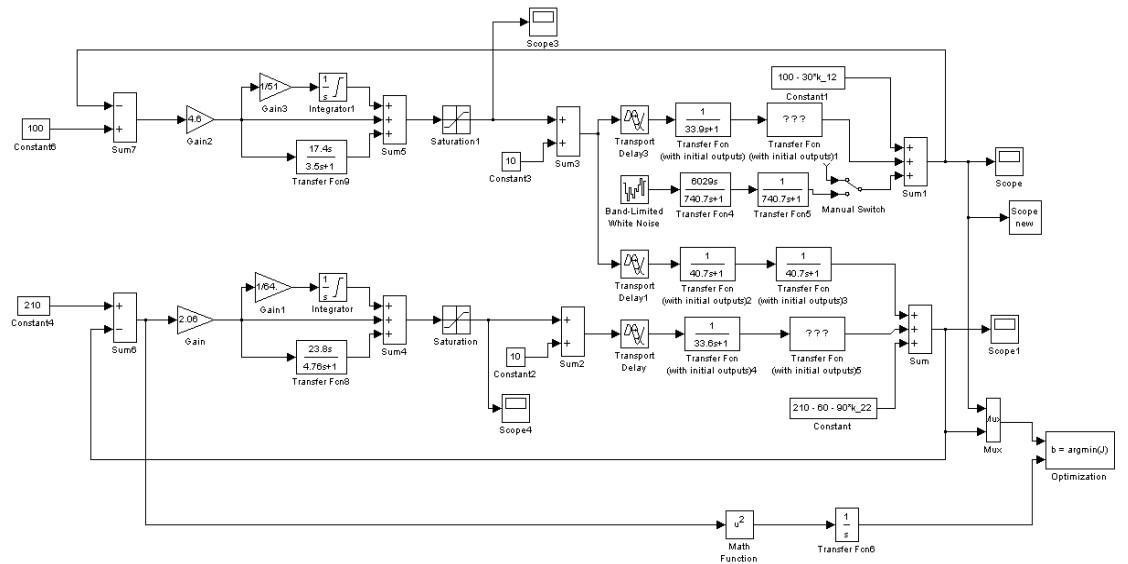


Рис. 2.4 – Схема моделювання базової САР

Перехідні характеристики САР за каналами регулювання θ_{33} та θ_1 наведено на рис.2.5 і 2.6.

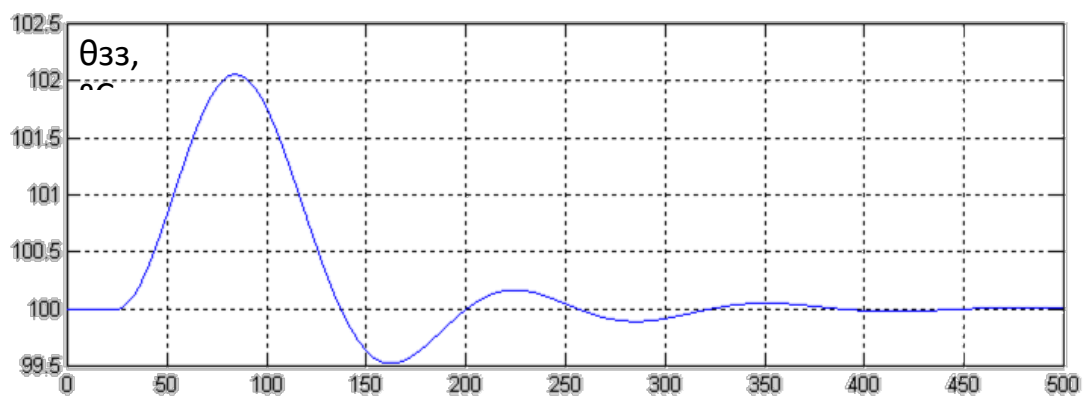


Рис. 2.5 – Перехідна характеристика САР температури у зоні зволоження

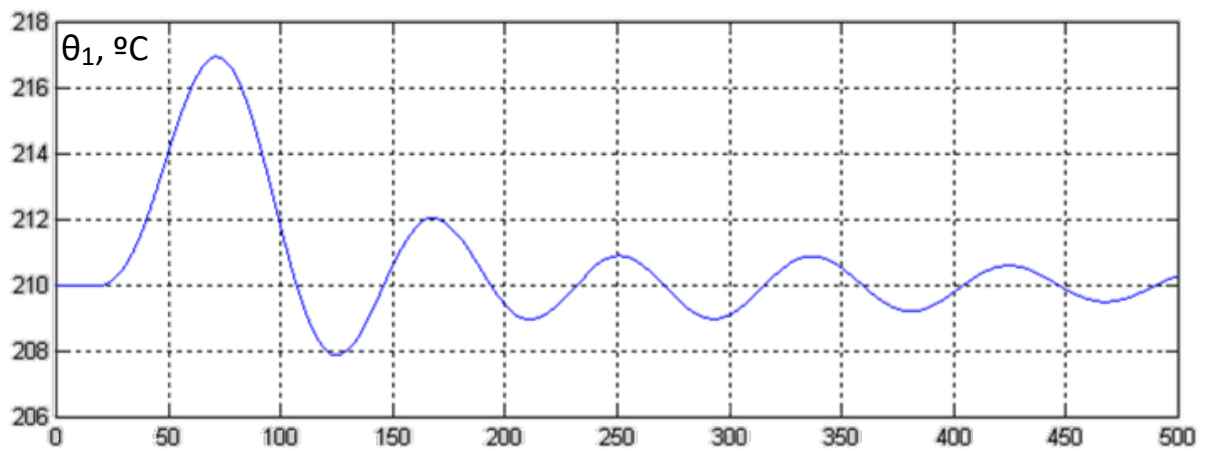


Рис. 2.6 – Перехідна характеристика САР температури у першій зоні випічки

Результати перевірки САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОК, а саме, часу запізнення та коефіцієнту передачі в межах $\pm 20\%$. наведено на рис. 2.7.

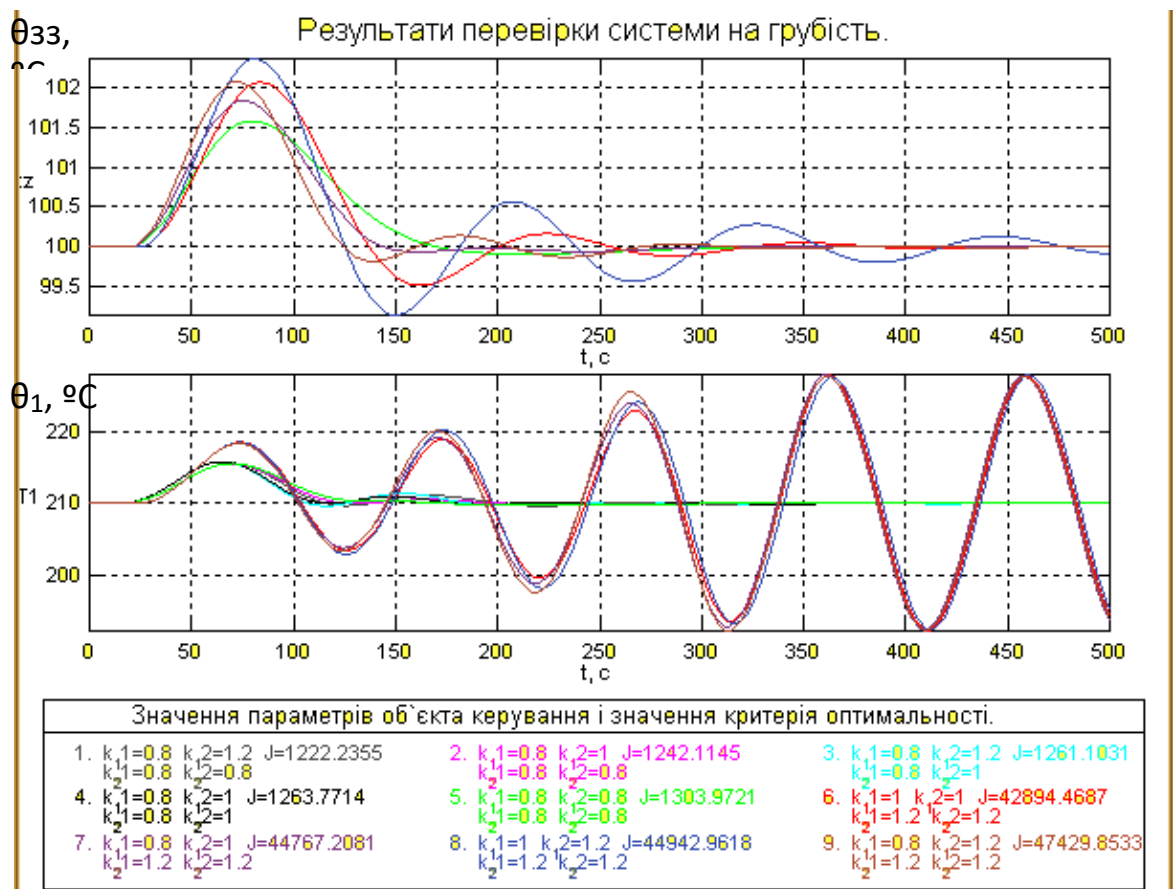


Рис. 2.7 – Результати перевірки САР на грубість в умовах варіації параметрів ОК

Як видно з результатів оцінки САР на грубість, в умовах варіації параметрів ОК САР за каналом регулювання температури у першій зоні випічки дає перехідні процеси, що розходяться, а значить, САР є негрубою. Тобто система стає непрацездатною.

Додаємо у регулятор температури у першій зоні випічки передаточну функцію коригуючого зв'язку що забезпечує компенсацію запізнення у складовій власного руху системи.

Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу приведена на рис. 2.8.

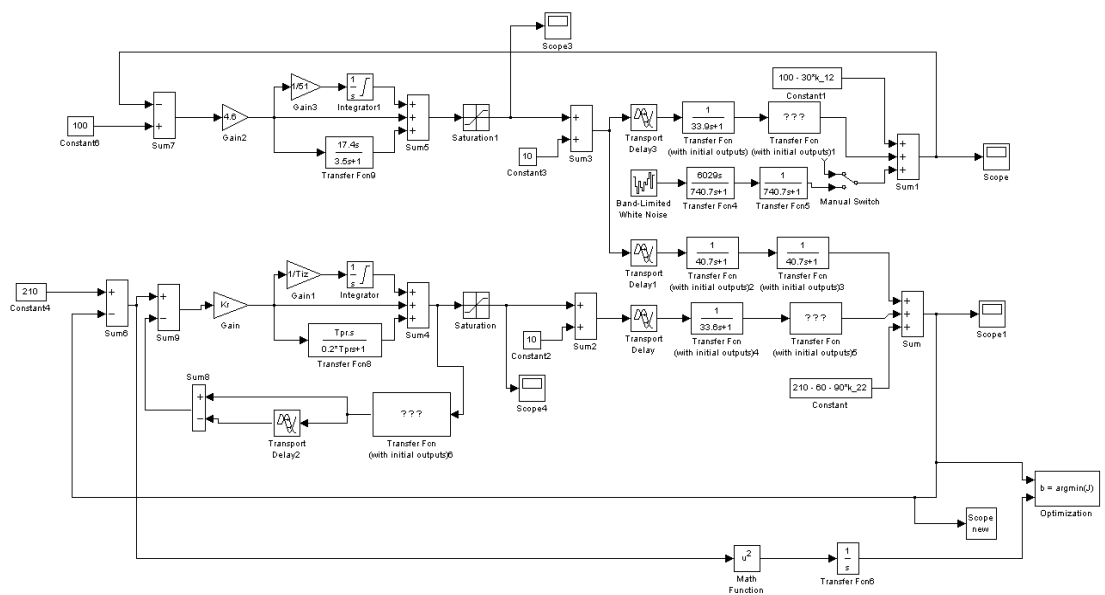


Рис. 2.8 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для проведення оптимального параметричного синтезу регулятора та коригуючого зв'язку, що забезпечує компенсацію запізнення у власному русі системи

Проведемо оптимізацію параметрів регулятора та коригуючого зв'язку в умовах параметричної невизначеності параметрів моделі ОК. Тобто при варіації параметрів ОК. Змінювати будемо час запізнення та коефіцієнту передачі моделі ОК в межах $\pm 20\%$. Одночасна оптимізація параметрів регулятора та параметрів коригуючого зв'язку потрібна для забезпечення високої динамічною точності САР і необхідного запасу її стійкості.

Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора та коригуючого зв'язку наведені на рис. 2.9.

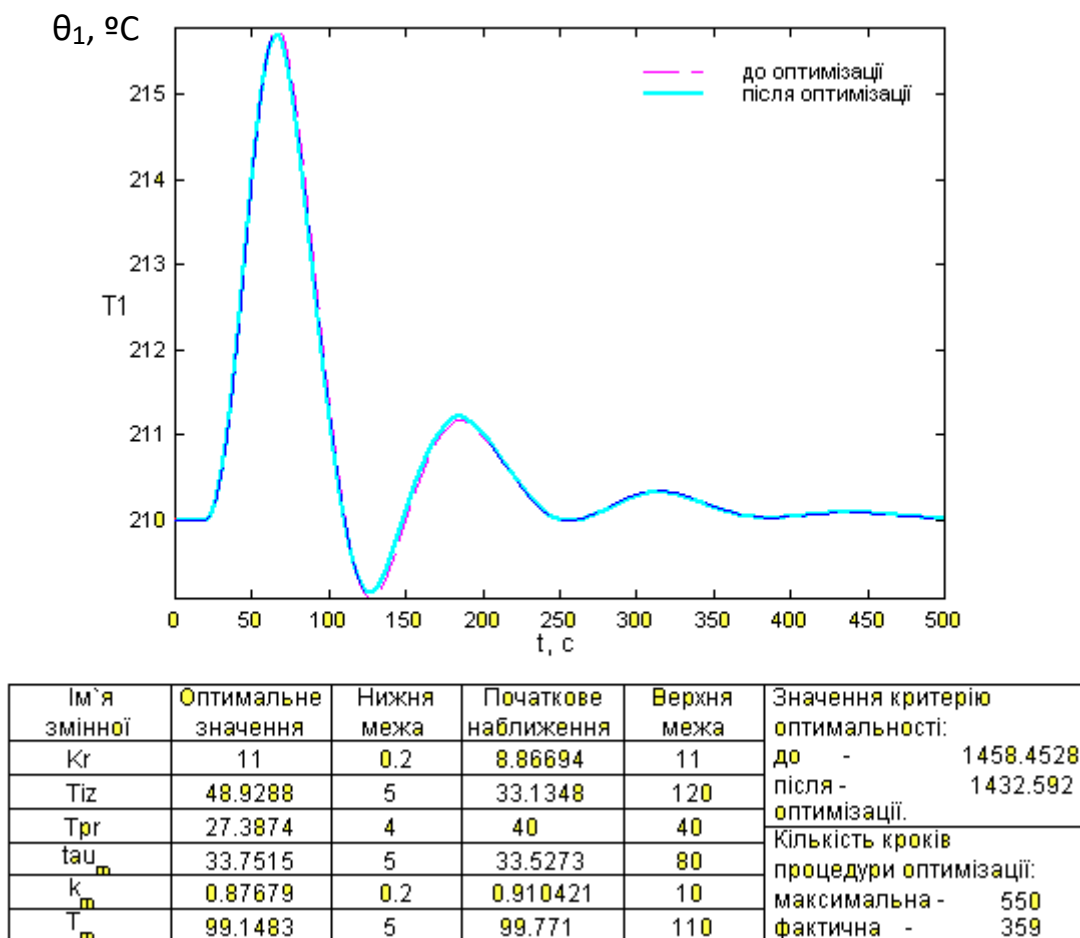


Рис. 2.9 – Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора та коригуючого зв'язку

Проведемо аналіз грубості САР підвищеної динамічної точності до варіацій параметрів об'єкту регулювання. Як і в випадку з САР базової структури, САР підвищеної динамічної точності досліджуємо на грубість в умовах варіації параметрів ОК, а саме, часу запізнення та коефіцієнту передачі в межах $\pm 20\%$. Найсприятливішими параметрами для ОК є $0,8 \cdot \tau$. Найнесприятливішими параметрами для ОК є $1,2 \cdot \tau$.

Результати перевірки САР підвищеної динамічної точності на грубість в умовах варіації параметрів ОК наведено на рис. 2.10. Як видно з результатів оцінки САР на грубість, в умовах варіації параметрів ОК САР дає перехідні процеси, що сходяться, а значить, САР будемо вважати грубою. І на відпадок

від САР базової структури САР ПДТ при найнесприятливіших параметрах ОК веде себе стабільно.

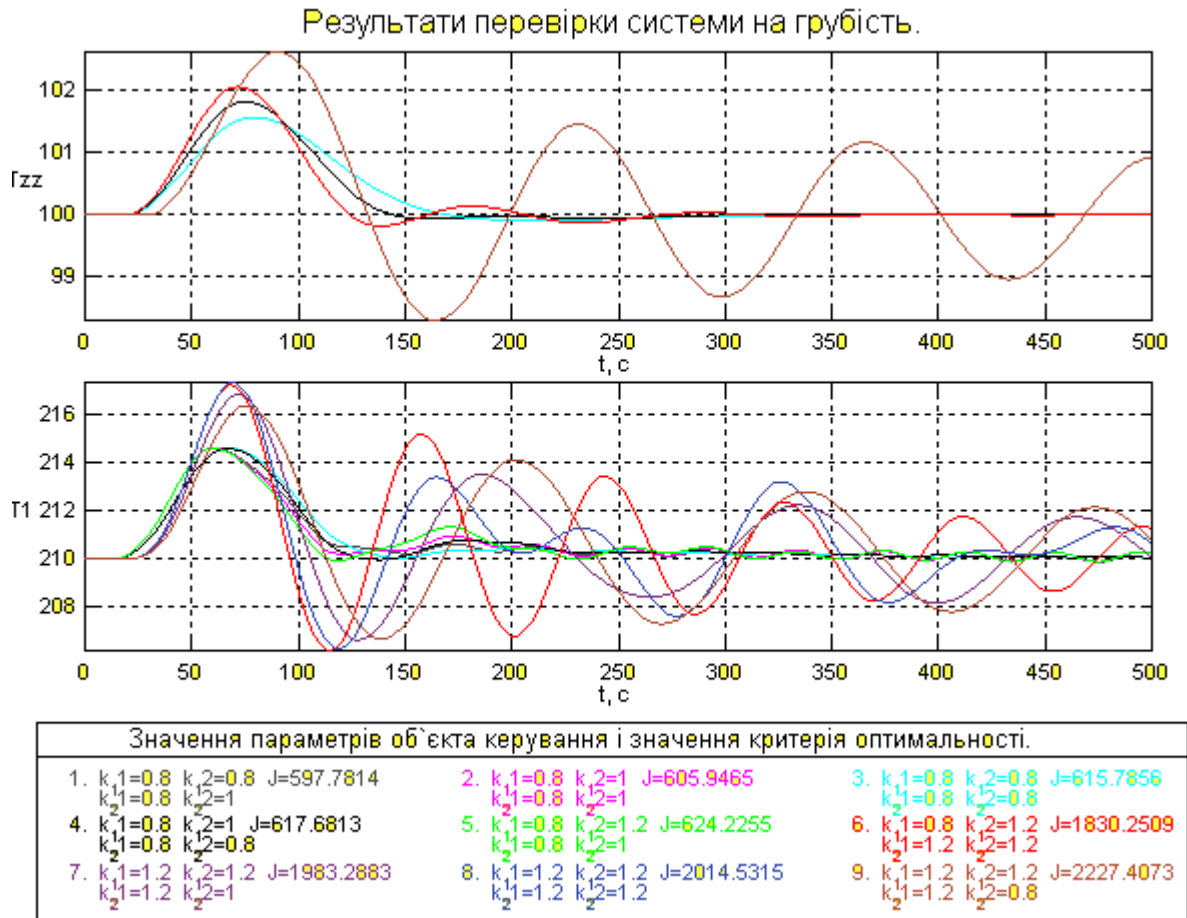


Рис. 2.10 – Результати перевірки САР на грубість в умовах варіації параметрів ОК

Доповнимо схему моделювання коригуючим зв'язком що забезпечує автономність контуру регулювання температури у першій зоні випічки від керуючої дії контуру регулювання температури у зоні зволоження.;

Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку приведена на рис. 2.11, а результати оптимізації – на рис. 2.12.

Передаточна функція коригуючого зв'язку, що забезпечує автономність, не входить до власного оператора системи регулювання температури у першій зоні випічки, тому можна провести оптимальний параметричний синтез тільки

коригуючого зв'язку. Структуру передаточної функції коригуючого зв'язку залишаємо розробленою раніше.

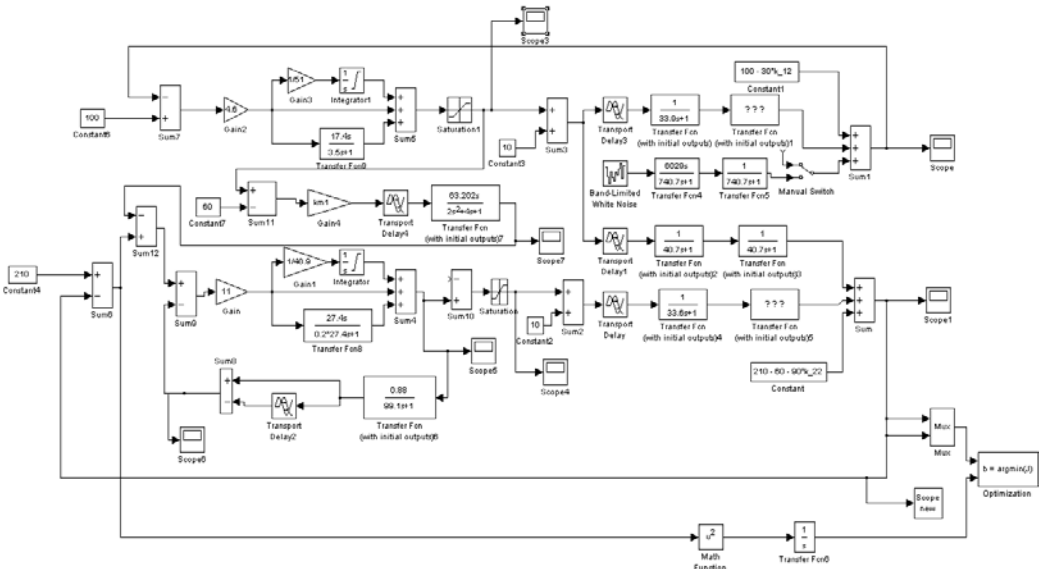
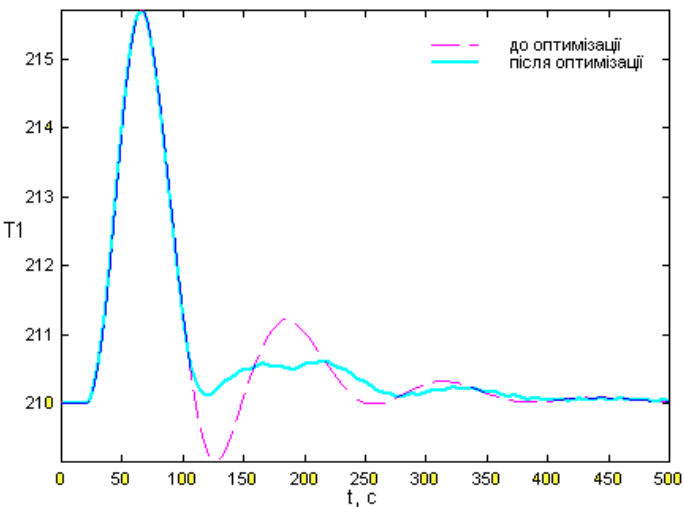


Рис. 2.11 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку, що забезпечує автономність



Ім'я змінної	Оптимальне значення	Нижня межа	Початкове наближення	Верхня межа	Значення критерію оптимальності:
T_1	12.882	2	2	110	до - 1196.912
T_2	2	2	70	90	після - 1152.1458
T_3	52.9	2	35.7	100	оптимізації.
km1	0.13857	0.05	0.05	7	Кількість кроків процедури оптимізації:
					максимальна - 550
					фактична - 201

Рис. 2.12 – Результати оптимізації налаштувань коригуючого зв'язку в автономній САР

Повторну перевірку САР на грубість можна не проводити так як коригуючий зв'язок не впливає на стійкість САР.

Проведемо порівняльний аналіз роботи розглянутих варіантів САР. Розглянемо тільки контур регулювання температури у першій зоні випічки θ_1 , тому що у контурі регулювання температури у зоні зволоження ми нічого не змінювали. Введемо наступні позначення: САР ПДТ1 – САР з компенсацію запізнення у власному русі; САР ПДТ2 – САР з компенсацію запізнення у власному русі та автономністю відносно зміни керуючої дії у контурі регулювання температури у зоні зволоження. Результати порівняльного аналізу наведено на рис. 2.13 та у таблиці 2.1.

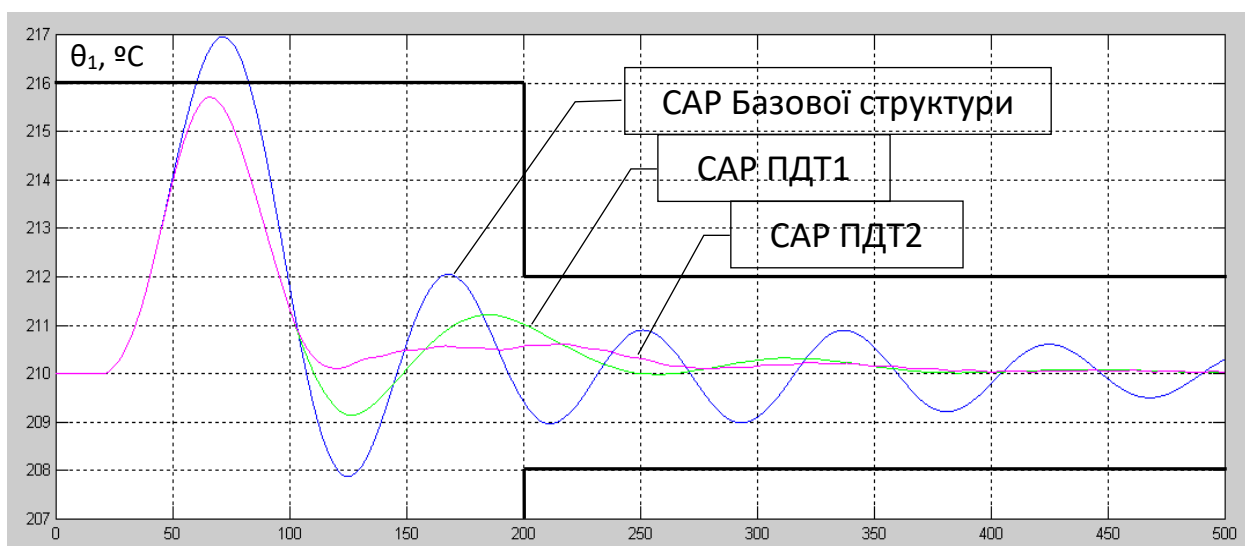


Рис. 2.13 – Перехідні процеси в САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності

Таблиця 2.1 – Результати порівняння САР базової структури і САР підвищеної динамічної точності в перехідних режимах

Структура САР	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta \theta_1^{МАКС}$	$T_{пп}, c$	
Базова	7	170	1975
Підвищеної динамічної точності (САР ПДТ1)	5,6	92	1197
Підвищеної динамічної точності (САР ПДТ2)	5,6	92	1152

За результатами порівняльного аналізу можна зробити висновок, що удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання за рахунок реалізації алгоритмів компенсації запізнення у власному русі та забезпечення автономності температури у першій зоні випічки відносно зміни керуючої дії у контурі регулювання температури у зоні зволоження, дозволило підвищити динамічну точність регулювання θ_1 та забезпечити необхідний рівень запасу стійкості САР та її грубість.

Підвищення динамічної точності САР з ПД-регулятором дало зменшення інтегрального показника якості та прямих показників якості перехідних процесів.

Для технічної реалізації доцільно використовувати САР підвищеної динамічної точності (САР ПДТ2), що забезпечує компенсацію запізнення у власному русі та автономність.

2.4 Висновки за розділом

В даній роботі удосконалені алгоритми САР температури у першій зоні випічки. В алгоритмі регулювання одночасно реалізовано компенсацію запізнення у власному русі (упереджувач Сміта) та автономність відносно зміни керуючої дії у контурі регулювання температури у зоні зволоження. Результати моделювання показують що введення коригуючих зв'язків дозволило зменшити прямі та інтегральні показники якості тобто підвищити динамічну точність САР та одночасно забезпечити її необхідний рівень запасу стійкості.

РОЗДІЛ 3 ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЯКІ РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИПІЧКИ ХЛІБА, НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ЛОГІЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ТА ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем управління побудованих на базі апарата нечіткої логіки та штучної нейронної мережі для розглянутого об'єкта керування

Нечітке управління (управління на основі методів теорії нечітких множин) використовується при недостатньому знанні об'єкта управління, але при наявності досвіду управління ним, в нелінійних системах, ідентифікація яких занадто трудомістка, а також у випадках, коли за умовами задачі необхідно використовувати знання експерта.

Для технічних систем з випадковим характером впливу, що збурює, складністю розробки динамічної моделі, її високим порядком, нелінійним характером можна говорити про проблему управління в умовах невизначеності. Використання нечітких регуляторів забезпечує грубість і стабільну збіжність процесів, тому такий підхід слід вважати доцільним. Основна перевага нечіткого підходу – можливість формування числа правил управління залежно від комбінації значень вхідних змінних регулятора і, отже, від зміни режиму роботи, рівня збурювань. Також особливою проблемою в сфері автоматизації є управління об'єктами, функції яких описуються нелінійними залежностями. При проектуванні систем управління для нелінійних об'єктів зазвичай використовуються такі методи як лінійна апроксимація або кусочно-лінійна апроксимація. Однак застосування цих методів у реальних технічних пристроях не завжди дозволяє досягнути бажаного ефекту. У цьому випадку для забезпечення збільшення ефективності можна використовувати систему управління з нечіткою логікою («fuzzy logic»).

Таким чином, в умовах наявності істотних невизначеностей у статичних і динамічних характеристиках тунельній печі з випічки хліба як об'єкта управління представляються труднощі в формалізації завдань синтезу регуляторів системи управління. У зв'язку з цим доцільним (актуальним) є застосування регуляторів, заснованих на нечіткій логіці.

У якості переваги нечіткого регулювання можна також відзначити наявність сучасних систем програмування контролерів з вбудованими бібліотеками нечіткого управління, що мають добрий графічний інтерфейс, у якому дуже легко і наочно представляється і коректується вид функцій приналежності і нечіткого висновку. Отже, спрощується і налаштування системи автоматичного регулювання.

3.2 Реалізація в програмному середовищі MATLAB/Simulink моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування з нелінійними статичними характеристиками

Для підтвердження актуальності застосування системи управління, побудованої на базі апарата нечіткої логіки, для розглянутого у даній роботі об'єкта управління, необхідно перейти до його нелінійної моделі. Таким чином, модель каналу регулювання розглянутого об'єкта управління повинна характеризуватися несуттєво нелінійною статичною характеристикою.

Для представлення нелінійної моделі об'єкта управління необхідно до відповідних моделей каналів регулювання додати відповідні нелінійні ланки. Нелінійність необхідно реалізувати за допомогою включення блоку Look up Table у відповідну модель каналу регулювання. Структурна схема повної моделі об'єкта управління з додатковими блоками Look up Table, які визначає нелінійність статичної характеристики, представлена на рисунку 3.1.

На рисунку 3.1 відображено повну модель об'єкту управління, яка є більш розширеною моделлю, розробка якої представлена в розділі 2 роботи. У блоці Look up Table у табличній формі задається нелінійний зв'язок

(залежність) між вхідними змінними, який тягне «викривлення» статичної характеристики моделі каналу регулювання.

В остаточному підсумку в результаті моделювання була отримана статична характеристика моделі каналу регулювання « $u_2 - \theta_1$ », яка має вигляд, представлений на рисунку 3.2. З рисунку 3.2 видно, що статична характеристика несуттєво нелінійна, це дає можливість виконати синтез САУ з традиційними ПД регуляторами і одержати необхідні показники якості регулювання.

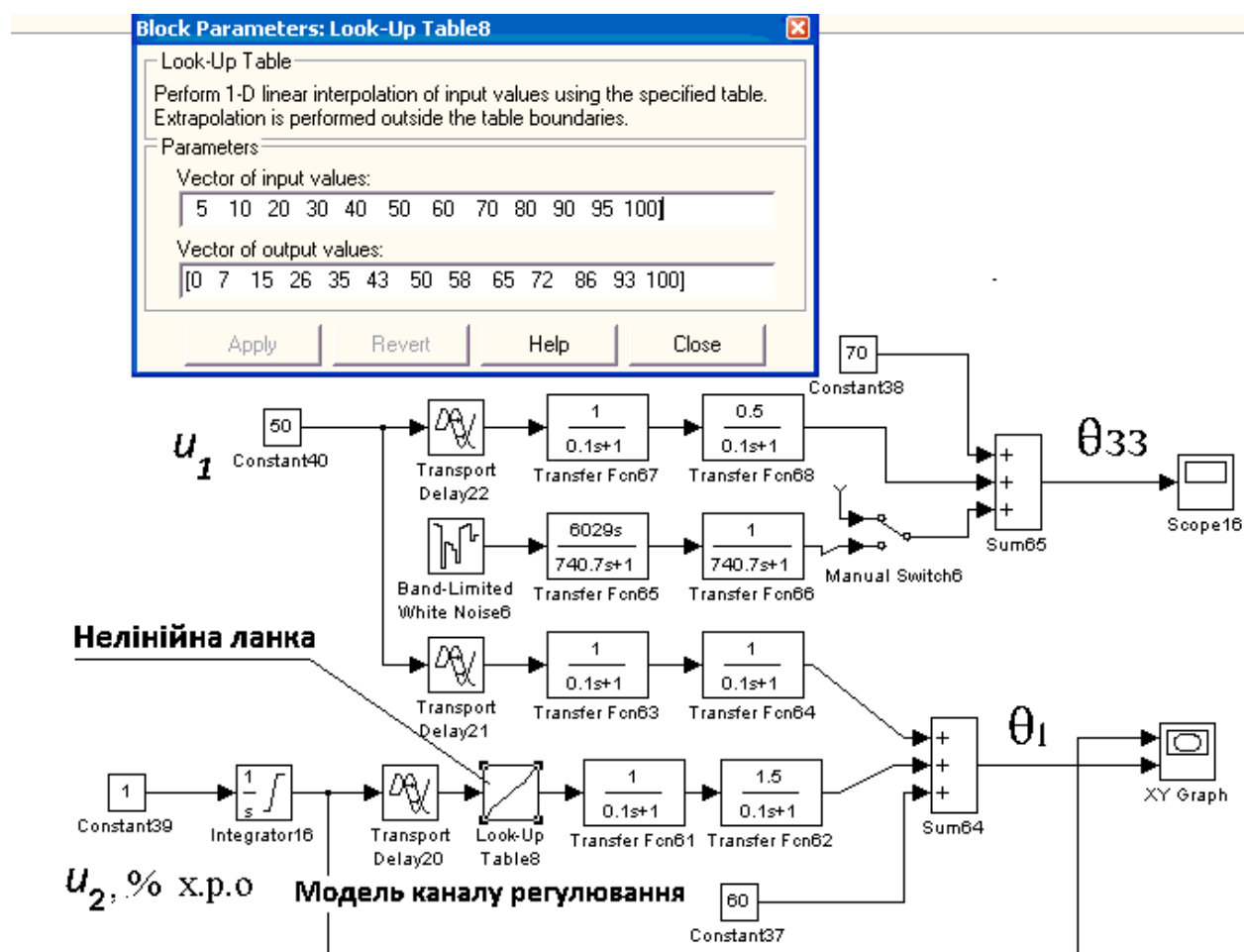


Рис. 3.1 – Структурна схема моделі об'єкта управління, що характеризується нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання

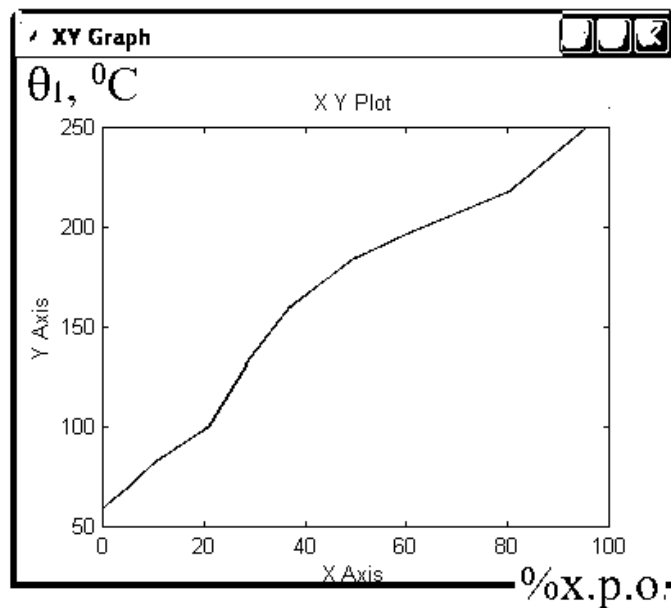


Рис. 3.2 – Нелінійна статична характеристика моделі каналу регулювання

3.3 Синтез САР з нелінійною моделлю ОК і традиційним ПД-регулятором

У даній роботі був виконаний параметричний синтез САУ з традиційним – лінійним ПД регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання. Слід зазначити, що нелінійність статичної характеристики була реалізована в моделі, «гладкої» і несуттєвої для одержання стійких перехідних процесів при застосуванні традиційних – лінійних (П, ПІ, ПІД) регуляторів.

Параметри настроювання регуляторів були визначені на основі статичних і динамічних параметрів об'єкта управління в рамках лінійної моделі.

Для реалізації параметричної оптимізації регуляторів системи управління в програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була розроблена схема моделювання системи управління з автоматичним оптимізатором, що забезпечує пошук оптимальних параметрів регуляторів за наступним критерієм якості роботи системи:

$$J = \int_0^{\infty} (e_1^2(t) + 0,5 \cdot e_2^2(t)) dt \rightarrow \min$$

$e_1(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням температури θ_{33} ;

$e_2(t)$ – різниця в часі між фактичним значенням регульованої величини і заданим значенням температури θ_1 ;

Розроблена схема моделювання системи управління з автоматичним оптимізатором у середовищі MATLAB\Simulink 5.2 представлена на рисунку 3.3.

У результаті параметричної оптимізації за обраним інтегральним показником якості роботи системи та за допомогою відповідного модуля – додатка MATLAB\Simulink 5.2 були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації і відповідні параметри налаштування регуляторів.

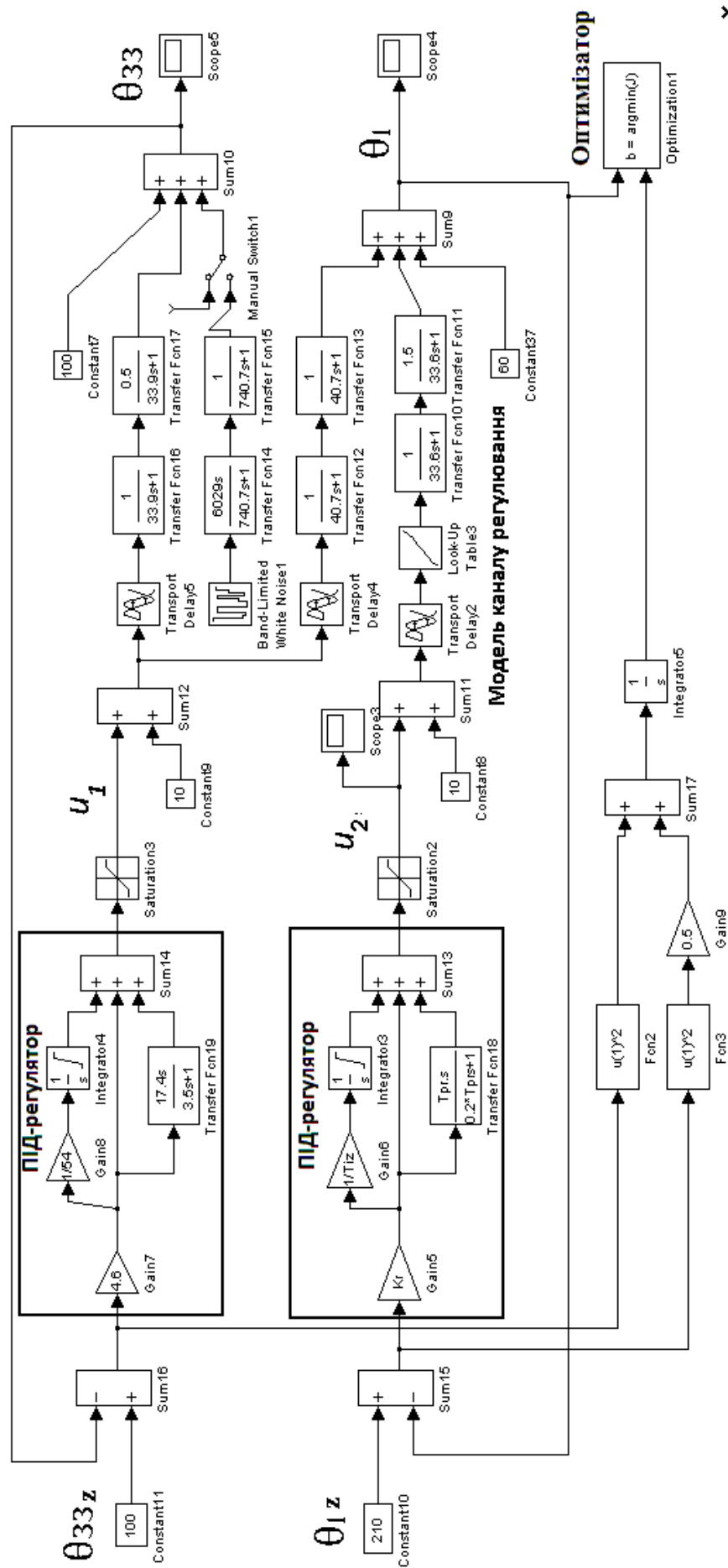


Рис. 3.3 – Структурна схема моделі САУ з традиційним ПІД-регулятором і параметричним оптимізатором, та структурна схема моделі оптимізованої САУ що реалізована засобами MATLAB\Simulink

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів технологічний параметр температура в зоні зволоження θ_1 , повинен підтримуватися на рівні $y^{зд}=110^{\circ}\text{C}$, з точністю $\pm 1^{\circ}\text{C}$. За параметри припустимі короточасні відхилення до $\pm 5^{\circ}\text{C}$ протягом часу не більше 60с.

Первісні значення параметрів настроювання регуляторів і відповідні оптимальні значення представлені на рисунках 3.4.1 та 3.4 у вікні результатів оптимізації. Також на рисунку 3.4 представлені відповідний графік перехідного процесу, отриманого після оптимізації системи. Із графіків перехідних процесів видно, що якість регулювання, за температурою, помітно покращилася після оптимізації САУ. Однак слід зазначити, що при нелінійній характеристиці каналу регулювання такі покращення можуть мати місце лише при відповідних режимах роботи чи початкових умовах системи управління. Таким чином, оптимальні параметри настроювання в даному випадку можуть бути неоптимальні в іншому випадку, це визначає необхідність застосування нелінійних регуляторів.

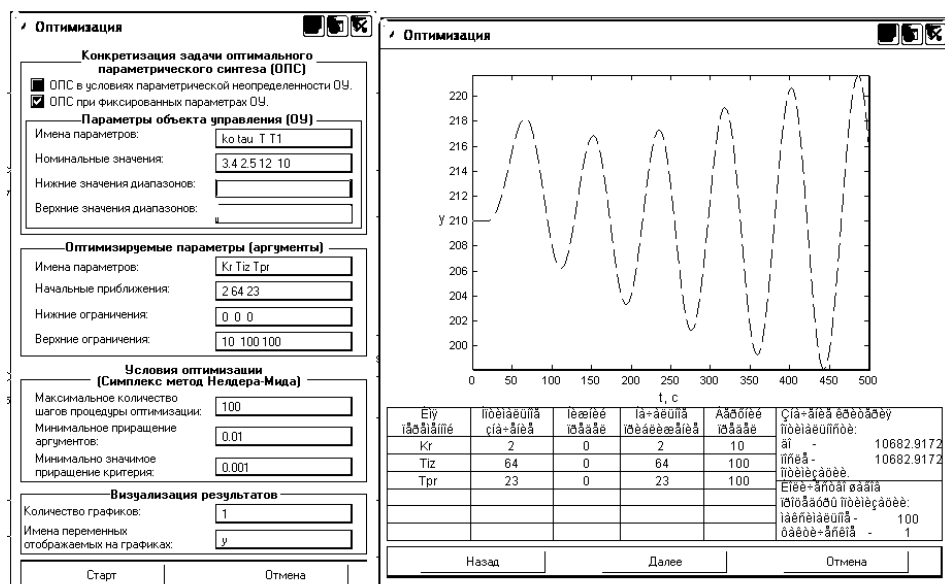


Рис. 3.4.1 – Початкові характеристики до параметричної оптимізації значень параметрів регулятора САУ з каналом регулювання, що характеризуються нелінійною статичною характеристикою

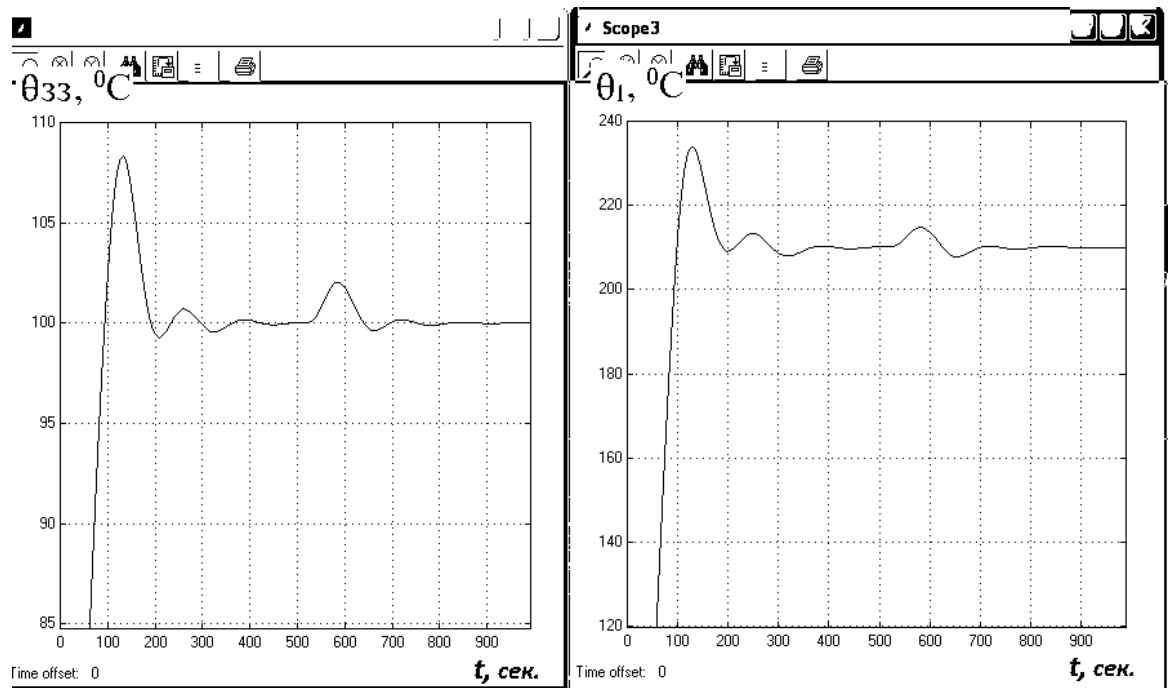


Рисунок 3.4.2 – Графіки перехідних процесів, що отримані в результаті моделювання оптимізованої САР

3.4 Синтез САР з нелінійним ОК на основі нечіткого регулятора

З урахуванням властивостей тунельної печі з випечкі хліба, як нелінійного об'єкта управління, доцільно застосувати в контурі регулювання температури θ_1 нечіткий логічний регулятор (НЛР), який має властивості нелінійного регулятора. Застосування нечіткого-логічного регулятора (Fuzzy – регулятора) обумовлено наявністю нелінійного об'єкта управління, а також складного опису його статичних режимів роботи.

Складність опису статичних режимів роботи об'єкта приводить до того, що режими функціонування можуть бути описані з недостатньою точністю, пов'язаною з нечіткими (розмитими) різними експериментальними даними. Таким чином, у справжній роботі була реалізована модель САР із Fuzzy – нечітким регулятором.

Нечіткий регулятор, що розробляється у даній роботі, являє собою об'єднання на деякій елементній базі трьох блоків фазіуправління: фазіфікація, логічного висновку і дефазіфікація. Спрощена структурна схема розробляємої системи керування на базі нечіткого регулятора представлена на рисунку 3.5. З погляду структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних нечітких регуляторів і будується за класичними зразками.

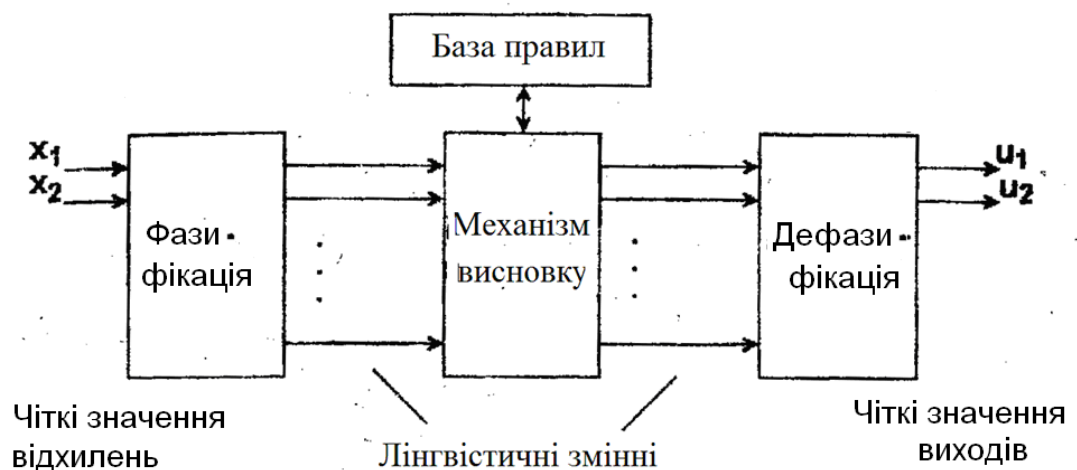


Рис. 3.5 – Спрощена структурна схема нечіткого регулятора

Всі визначені блоки (фазіфікація, блок логічного розв'язку, дефазіфікація), що представлені на рисунку 3.5, редагуються у відповідному редакторі FIS Editor середовища MATLAB. Для запуску вікна fis-редактора в командному вікні MATLAB Window commander було прописано команду «Fuzzy». Після чого було вибрано алгоритм Sugeno та дві вхідні і дві вихідні змінні.

На рисунку 3.6 зображено вікно налаштування fis-файлу для нечіткого регулятора тиску газу з відповідними вхідними та вихідними сигналами.

До теперішнього часу запропоновано кілька алгоритмів нечіткого висновку (алгоритм Мамдані, Цукамото, Ларсена, Сугено та ін.). У даній роботі представляється алгоритм Сугено 0-порядку, так як він являється найпростішим алгоритмом нечіткого виводу.

Формально алгоритм Сугено, запропонований Сугено та Такагі, може бути визначений таким чином.

У базі правил використовуються тільки правила нечітких продукцій в формі:

ПРАВИЛО <1>: ЯКЩО $(x \in A_1 \text{ і } y \in B_1)$, ТО, $z_1 = f(x_1, \dots, x_n)$,

ПРАВИЛО <2>: ЯКЩО $(x \in A_2 \text{ і } y \in B_2)$, ТО, $z_2 = f(x_1, \dots, x_n)$,

де x, y – вхідні змінні, A_i, B_i - нечіткі множини $z_1=f(x_1, \dots, x_n)$ - довільна чітка функція.

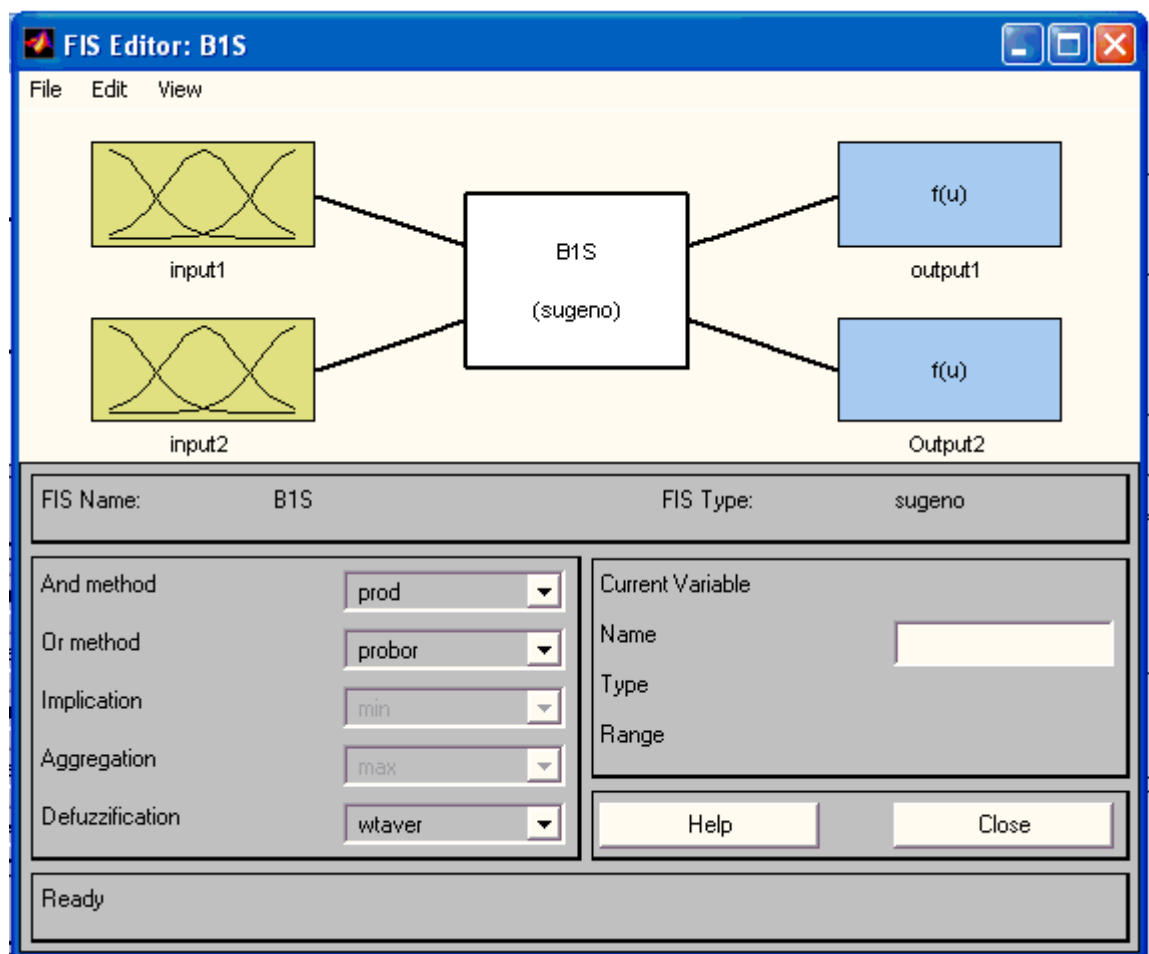


Рис. 3.6 – Вікно редактора нечіткого регулятора з двома входами і двома виходами сигналів

Якщо у якості f використовується поліном $f(x)=C_i$, то говорять про алгоритм Сугено 0-порядку. Тоді правила будуть мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \text{ПРАВИЛО } <1>: \text{ЯКЩО } (x \in A_1 \text{ } / y \in B_1), \text{ ТО, } z_1 = C_1, \\ \text{ПРАВИЛО } <2>: \text{ЯКЩО } (x \in A_2 \text{ } / y \in B_2), \text{ ТО, } z_2 = C_2, \end{aligned} \quad (1)$$

де C_1, C_2 - звичайні (чіткі) числа.

Розглядаючи структуру управління, можна визначити наступні п'ять правил функціонування НЛР у форматі «if – then», як показано вище у форматі (1):

П1: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «велика позитивна PE» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «приблизно нульова Z », то керуюча дія $u_1 = w1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = w2$;

П2: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «велика негативна NE» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія $u_1 = -w1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = -w2$;

П3: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «приблизно нульова Z», то керуюча дія $u_1 = 0$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = 0$;

П4: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «велика позитивна PE», то керуюча дія $u_1 = w1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = w2$;

П5: Якщо похибка регулювання e_1 належить нечіткій множині «приблизно нульова Z» і приріст похибки регулювання Δe_1 належить множині «велика негативна NE», то керуюча дія $u_1 = -w1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = -w2$.

Відповідно вище представленим правилам складемо таблиці баз знань для НЛР тиску в топці котла.

Як видно з рисунку 3.6, на вхід даного нечіткого регулятора будуть подаватись дві змінні – помилка регулювання (input1) та приріст помилки регулювання (input2). Для змінної input1 задаємо три трикутні функції

приналежності «trimf». Це проста функція принадлежности і найбільш часто застосовується. Трикутна функція принадлежности задається наступною аналітичною формулою:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$

[a, c] – діапазон зміни змінної, для справжнього випадку a = - 70, c = 70;
b - найбільш можливе значення змінної

Таблиця 3.1 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятора тиску в топці котла

$\begin{matrix} e_1 \\ \Delta e_1 \end{matrix}$	NE (Велика негативна Δe_1)	Z (приблизно нульова Δe_1)	PE (Велика позитивна Δe_1)
NE	–	$u_1 = -190;$ $\Delta u_1 = -4,8;$	–
Z	$u_1 = -190;$ $\Delta u_1 = -4,8;$	$u_1 = 0;$ $\Delta u_1 = 0;$	$u_1 = 190;$ $\Delta u_1 = 4,8;$
PE	–	$u_1 = 190;$ $\Delta u_1 = 4,8;$	–

Всі функції принадлежности були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рисунку 3.7 зображено вікно налаштування функцій принадлежности mf1, mf2, mf3 до нечітких множин похибка регулювання «велика негативна», «приблизно нульова», «велика позитивна» відповідно. Також були визначені функції принадлежности mf1, mf2, mf3 до нечітких множин приріст похибки регулювання «великий негативний», «приблизно нульовий» та «великий позитивний», які представлені на рисунку 3.8.

Згідно з таблицею 1 бази правил функціонування регулятора, були прописані відповідні правила у вікні редактора правил функціонування

нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink. Це вікно з відповідними правилами зображено на рисунку 3.9.

При дефазифікації вихідних змінних використовується модифікований варіант у формі методу центру тяжіння для одноточкових множин згідно з наступною формулою:

$$y_{out} = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot C_i)}{\sum_{i=1}^n (\alpha_i)}$$

де n – загальна кількість активних правил нечітких продукцій, у нашому випадку – 5 правил;

$\alpha_1 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(x_0))$, $\alpha_2 = \min(\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_2}(x_0))$ – значення ступенів істинності всіх висновків правил нечітких продукцій з використанням методу min-активізації.

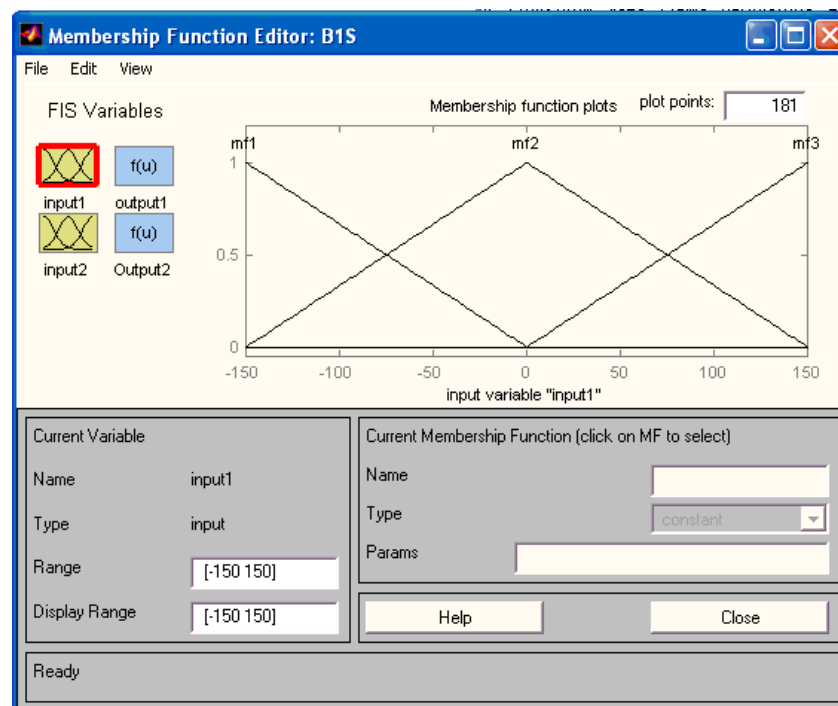


Рис. 3.7 – Вікно формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У даному випадку вихідні значення сигналів C_i згідно з алгоритмом Сугено нульового порядку були визначені у вікні реактора, представленого на рисунку 3.10. Виходами синтезованого нечіткого регулятора визначені зміни «output1» та «output2». Вихід «output1» буде відпрацьовувати інтегральну І-складову регулятора, а «output2» – відповідно П-складову.

Для запуску синтезованого алгоритму перетягнуто на робоче поле створення моделі SIMULINK блок «Fuzzy Logic Controller» зі стандартної бібліотеки. У відкритому вікні «Fuzzy Logic Controller» було записано в запропонованому полі ім'я fis-файлу, а в головному вікні налаштування fis-файлу було вибрано File / Save to Workspace для завантаження у робочій простір середовища MATLAB нечіткого алгоритму управління.

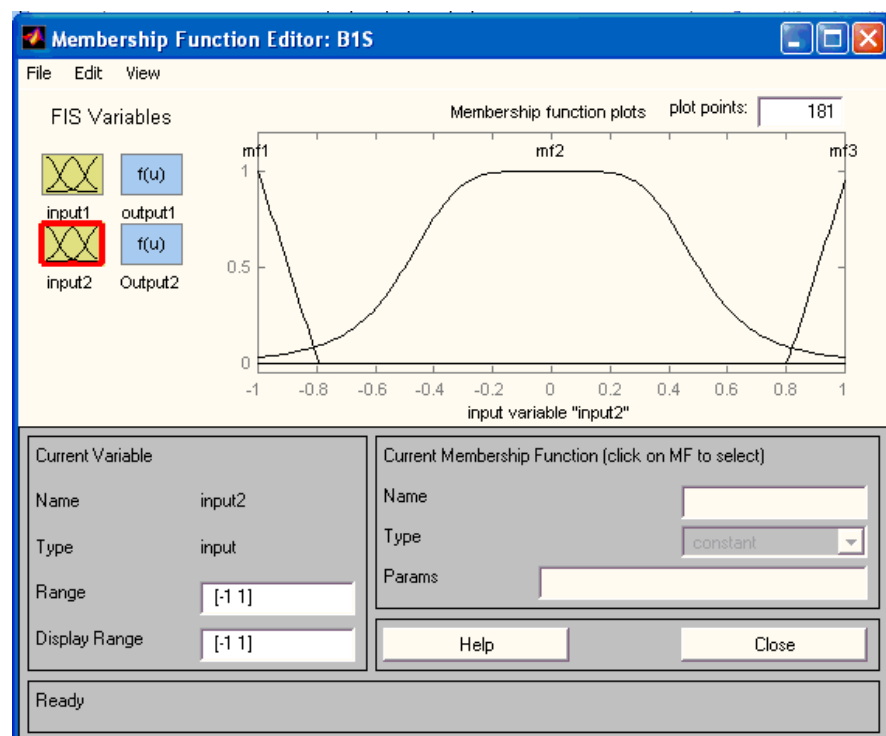


Рис. 3.8 – Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У кінцевому випадку була визначена схема моделювання САУ з нечітким регулятором, фрагмент якої представлений на рисунку 3.11. З

рисунку 3.11 видно, що управляюча дія нечіткого регулятора формується з декілька складових за формулою:

$$u(t) = u_1(t) + (u_2(t - \tau_z) + \Delta u_2)$$

де $u_1(t)$ – управляюча дія П-складової регулятора;

$\Delta u_2 = u_2(t) - u_2(t - \tau_z)$ – приріст управляючої дії від нечіткого регулятора; $u_2(t - \tau_z)$ – управляюча дія з затримкою за часом τ_z .

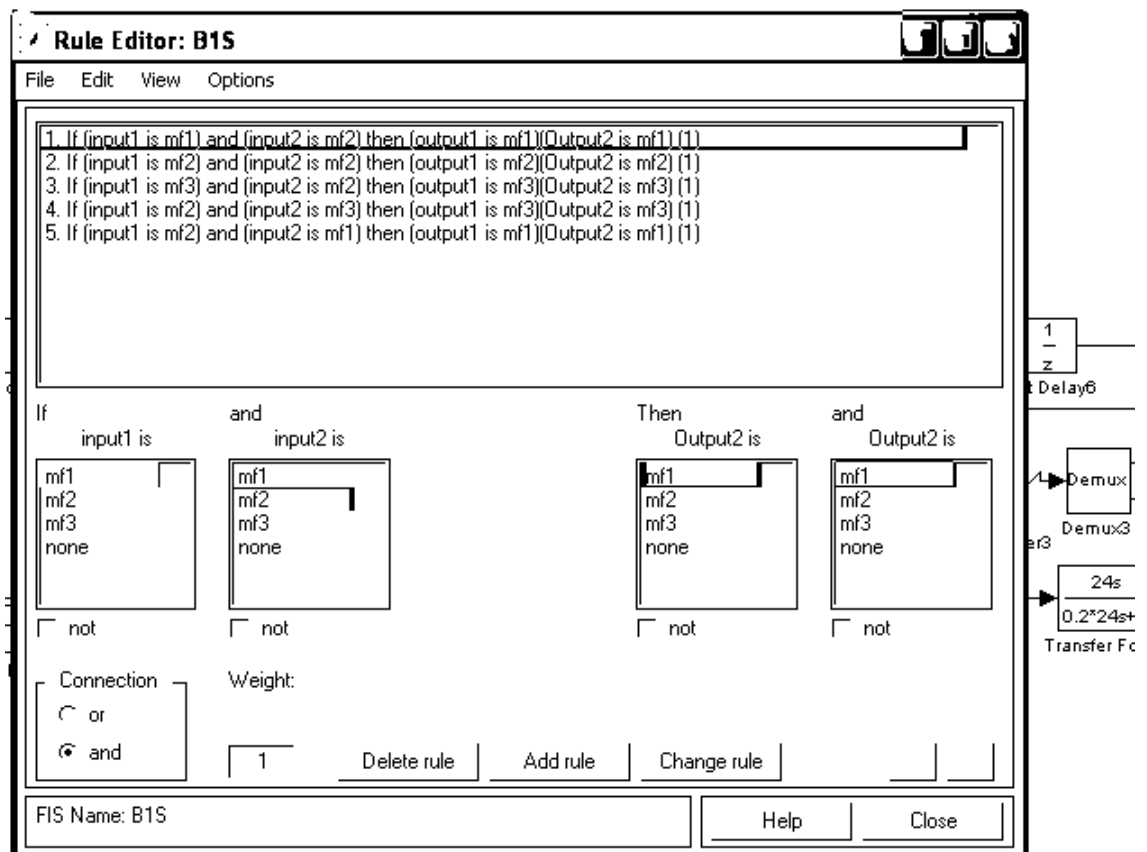


Рис. 3.9 – Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

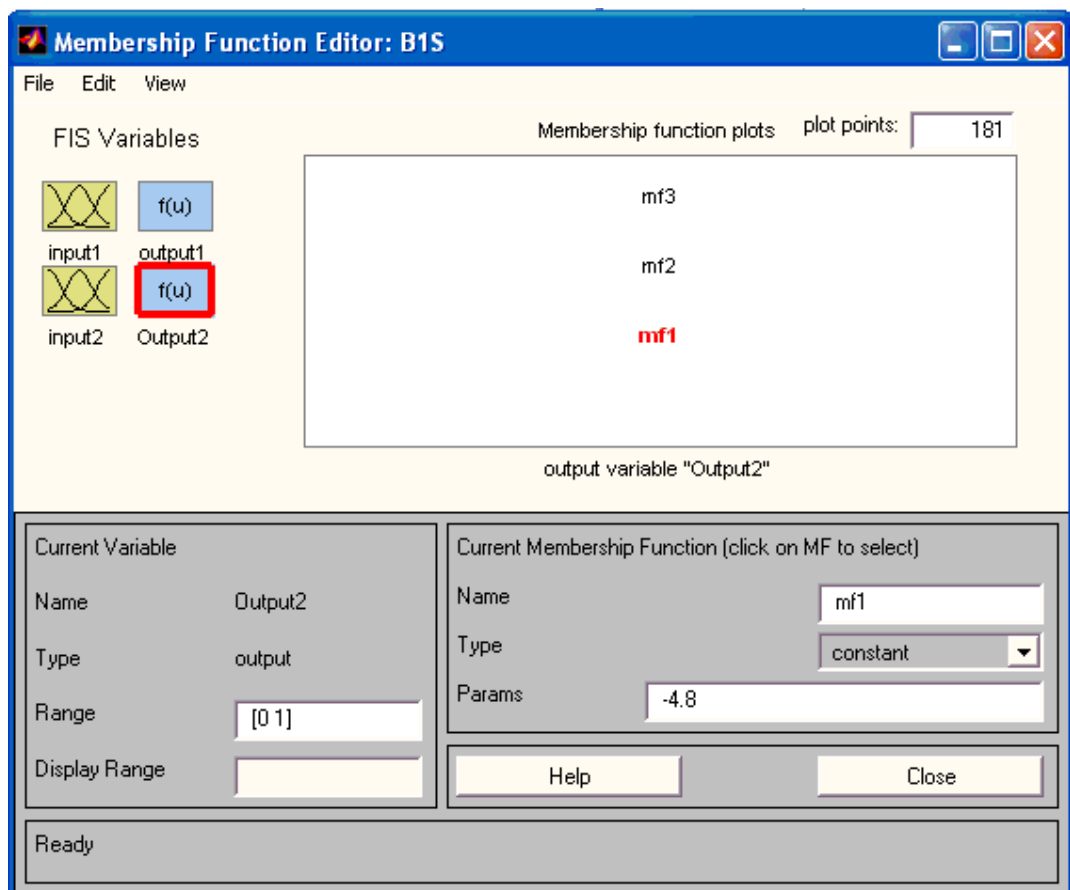


Рис. 3.10 – Вікно редактора вихідних значень нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

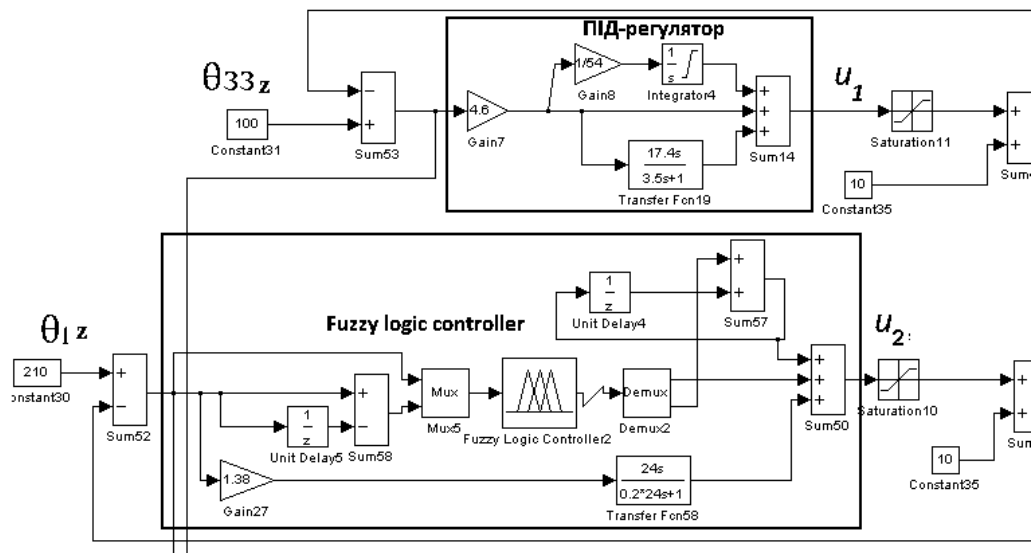


Рис. 3.11 – Фрагмент схеми моделювання САУ з нечітким логічним регулятором

Слід зазначити, що при синтезі нечіткого логічного регулятора «Fuzzy Logic Controller» всі функції приналежності к нечітким множинам та логічні правила функціонування визначені на базі експертних даних. А потім скореговані при моделюванні методом «проб і помилок». Також логічні правила функціонування були визначені з урахуванням правил функціонування нечітких регуляторів, представлених у відомих наукових роботах, одних із перших з Fuzzy управління.

У результаті моделювання САУ з нечітким регулятором були отримані графіки перехідних процесів з виходу системи на номінальний режим функціонування і також перехідні процеси при детермінованому і випадковому впливі, що збурює. Для порівняльного аналізу також були представлені відповідні графіки перехідних процесів у САУ з традиційним ПІД-регулятором.

Таким чином, на рисунку 3.12 представлені графіки перехідних процесів при детермінованому збурюванні.

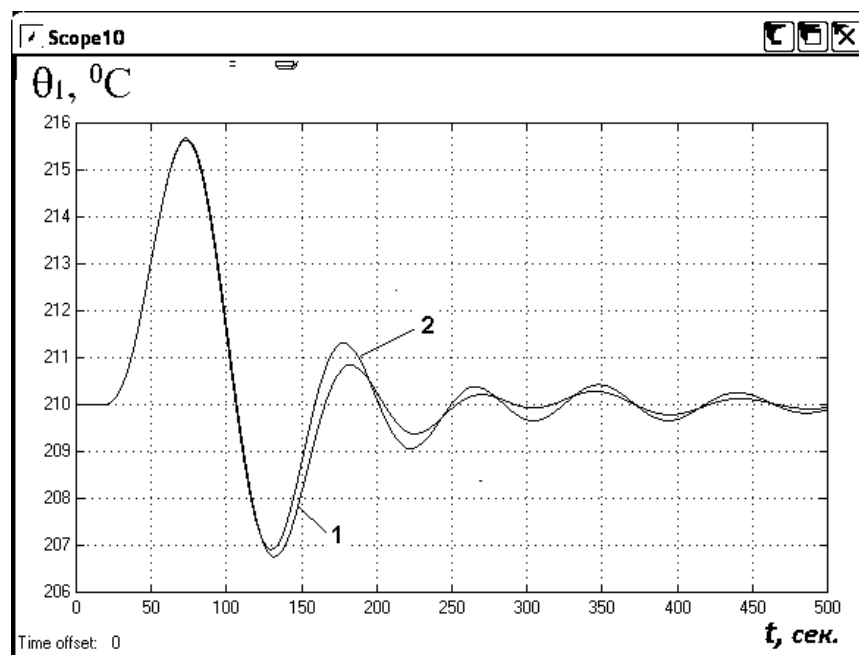


Рис. 3.12 – Графіки перехідних процесів, що отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес в неоптимізованій САУ з традиційним ПІД – регулятором; графік 2 – перехідний процес в САУ з нечітким регулятором

З рисунків можна побачити, що за якістю регулювання різні САУ функціонують ідентично, як з традиційним, так і з нечітким регулятором. Графіки перехідних процесів різні САУ зливаються в один. Це отримано завдяки корегуванню параметрів нечіткого регулятора, а також завдяки порівнянню функціонування САУ з нечітким регулятором і САУ з традиційним регулятором.

В справжній роботі також був синтезований нечіткий регулятор з висновком Мамдані. Виходячи з графіків перехідних процесів що представлені на рисунку 3.13 видно що за якістю регулювання САУ з нечітким регулятором з алгоритмом виведення Мамдані функціонує значно краще ніж САУ з нечітким регулятором з виведенням Сугено-0. Так, час регулювання, при східчастому впливу що збурює, зменшився десь у два рази і значно зменшалось максимальне динамічне відхилення.

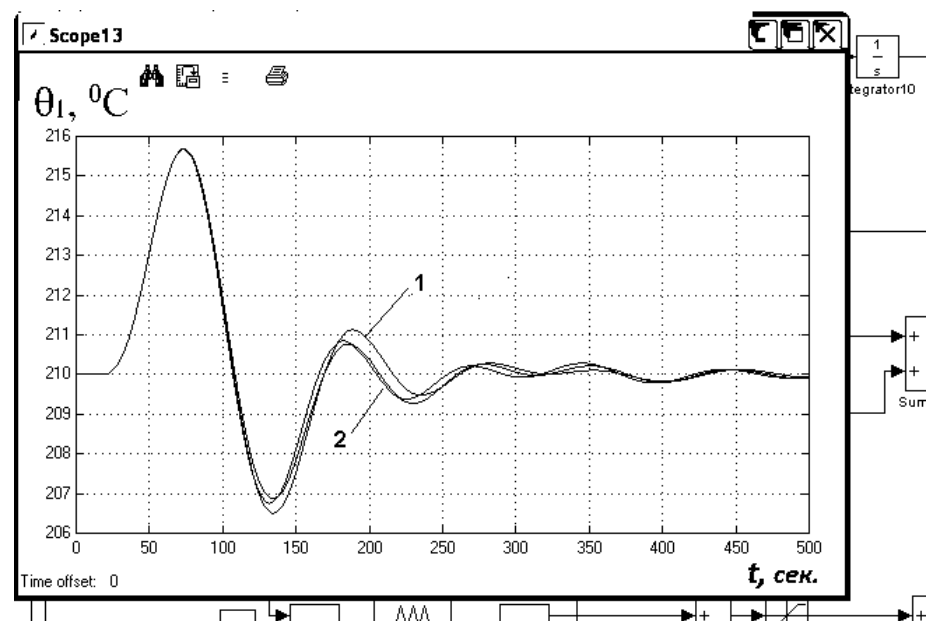


Рис. 3.13 – Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором з висновком Сугено -0; графік 2,3 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором який функціонує згідно з алгоритмом виведення Мамдані

Алгоритм Мамдані — алгоритм нечіткого логічного виводу по базі знань (базі правил) формується в предметній області у вигляді нечітких предикатних правил виду:

П1: якщо $x \in A_1$, тоді $z \in B_1$,

П2: якщо $x \in A_2$, тоді $z \in B_2$,

.....

Пn: якщо $x \in A_n$, тоді $z \in B_n$,

де x — вхідна змінна(ім'я для відомих значень даних), z — змінна виводу(ім'я для значення даних, яке буде обчислене). A_i та B_i — нечіткі множини, визначені на X та Z відповідно за допомогою функції приналежності та (z) .

У представлений ситуації даних вивід у формі алгоритму Мамдані математично можна представити наступним чином.

1. Введення нечіткості (fuzzification): для заданого(чіткого) значення аргументу $x = x_0$ знаходяться степені істинності для передумов кожного правила $\alpha_i = (x_0)$.

2. Нечіткий вивід: знаходиться рівні відсічення для передумов кожного з правил (з використання правила мінімуму):

$$\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0)$$

$$\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$$

де через $\wedge$ позначено операцію логічного мінімуму.

Потім знаходяться усічені функції належності:

$$C'_1(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z))$$

$$C'_2(z) = (\alpha_2 \wedge C_2(z))$$

3. Композиція: з використанням операції $\max$ (позначеної як $\vee$) виконується об'єднання знайдених усічених функцій, що приводить до отримання підсумкової нечіткої підмножини для змінної виходу з функцією належності.

$$M(z) = C(z) = C'_1(z) \vee C'_2(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(z))$$

Таким чином, для переходу від Сугено 0-го порядку до алгоритму Мамдані необхідно визначити вихідні функції приналежності $C_1(z)$, $C_2(z)$, $C_3(z)$ замість відповідних значень W_2 , $-W_2$, та C_1 , C_2 . На рисунках 3.13.1 та 3.13.2 представлені такі відповідні вихідні функції приналежності к множинам – «приріст управляючого впливу» великий (PE), «приріст управляючого впливу» приблизно нульовий (Z), «приріст управляючого впливу» від’ємний (NE).

Приведення до чіткості (дефазифікації). для моделі Мамдані використовують дефазифікація центроїдним методом, коли чітке значення вихідної змінної визначається як центр ваги для кривої результуючої функції приналежності $\mu_{\Sigma}(z)$.

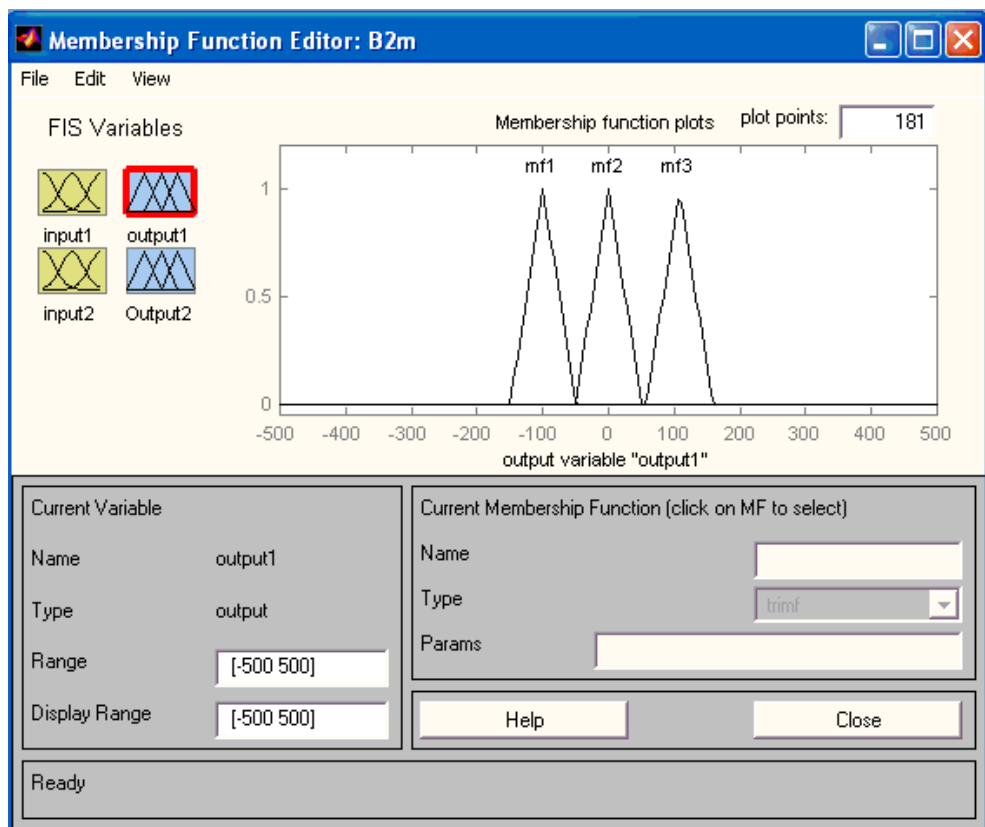


Рис. 3.13.1 – Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безлічей – «збільшення управляючого впливу PE, Z, NE» для алгоритму Мамдані

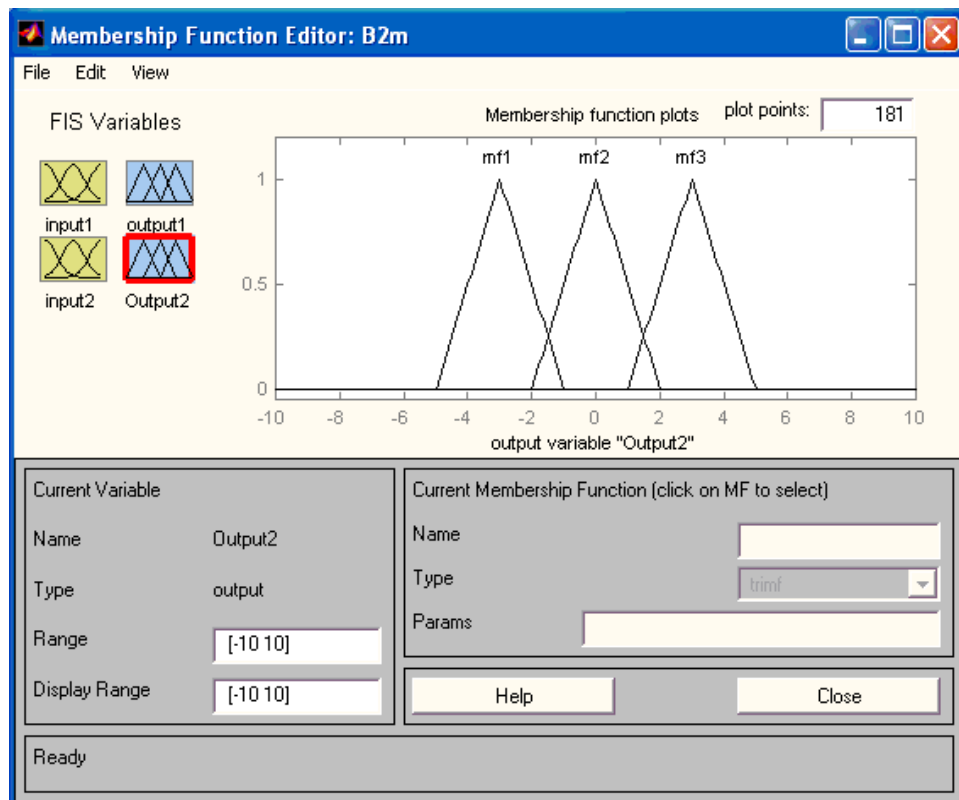


Рис. 3.13.2 – Вікна формування вихідних функцій приналежностей до нечітких безліч – «збільшення управляючого впливу PE, Z, NE» для алгоритму Мамдані

Для виконання чисельних розрахунків на етапі дефазифікації для алгоритму Мамадані використана формула центру ваги (тяжіння) (англ. Centre of Gravity, CoG) або центроїд площі що розраховується за формулою:

$$y = \frac{\int_{min}^{max} x \cdot \mu(x) \cdot dx}{\int_{min}^{max} \mu(x) \cdot dx},$$

де y – результат дефазифікації; x – змінна, що відповідає вихідній лінгвістичній змінній w_i ; $\mu(x)$ – функція приналежності нечіткої множини, що відповідає вихідній змінній w після етапу акумуляції; min, max – ліва та права точки інтервалу носія нечіткої множини вихідної змінної w .

При дефазифікації методом центру тяжіння звичайне (чітке) значення вихідної змінної дорівнює абсцисі центру ваги площі, обмеженою графіком кривої функції приналежності відповідної вихідної змінної.

3.5 Синтез САР з нелінійним ОК на основі нейронного регулятора

Штучні нейронні мережі (ШНМ) у цей час знаходять широке застосування в самих різних предметних областях. Одним з важливих напрямків використання штучних нейронних мереж є нейроуправління в системах автоматичного керування різних типів. Нейроуправління — це окремий випадок інтелектуального керування, при якому у якості інструмента для розв'язку завдань керування застосовуються штучні нейронні мережі. Потенційними областями застосування штучних нейронних мереж є ті, де людський інтелект малоефективний, а традиційні обчислення трудомісткі або фізично неадекватні. Актуальність застосування нейронних мереж багаторазово зростає, коли з'являється необхідність розв'язку погано формалізованих задач. Основні області застосування нейронних мереж: автоматизація процесу класифікації, автоматизація прогнозування, автоматизація процесу розпізнавання, автоматизація процесу прийняття розв'язків; управління, кодування і декодування інформації; апроксимація залежностей і ін.

Штучна нейронна мережа як нейрорегулятор здійснює нелінійне перетворення вхідного сигналу і формування управляючого впливу. При цьому регулятор може мати велику кількість оптимізованих параметрів (коефіцієнтів міжнейронних зв'язків), що дає можливість оптимізувати його практично під будь-який об'єкт з нелінійною статичною характеристикою. У даній роботі нейрона мережа — це математична модель з параметрами, що оптимізуються, яка буде виконувати функції розробленого раніше нечіткого логічного регулятора.

Нейрорегулятор у нашому випадку – це штучна нейронна мережа, що характеризується нелінійними характеристиками. Завдяки цьому застосування нейрорегулятора на базі нейронної мережі дозволить досягти більш високих результатів в управлінні. Нейрона мережа – це послідовність нейронів (нейронелементів), з'єднаних між собою синапсами. Структура нейронної мережі прийшла в світ програмування прямо з біології. Найбільш поширена структура – багат шарова, застосовується в якості регуляторів нейромережових алгоритмів управління.

Математична модель, що застосовується у якості нейронелементу у нейромереживому алгоритмі управління, аналогічна відомим найбільш розповсюдженим моделям, які схожі з формальною моделлю нейрона Маккаллоха – Питса. У даній моделі сигнали, що поступили на входи нейроелементу, множаться на свої ваги. Сигнал першого входу x_1 множиться на відповідну вагу w_1 . У підсумку отримуємо $x_1 w_1$. І так до n -ого входу. У підсумку на останньому вході отримуємо $x_n w_n$. Потім всі множення передаються в суматор. Уже виходячи з його назви можна зрозуміти, що він робить. Він просто підсумовує всі вхідні сигнали, помножені на відповідні ваги:

$$x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n = \sum_{i=1}^n x_i w_i$$

Просто так подавати виважену суму на вихід досить безглуздо. Нейроелемент повинен якось обробити її і сформувати адекватний вихідний сигнал. Саме для цих цілей і використовують функцію активації. Вона перетворює зважену суму в якесь число, яке і є виходом нейрона.

У зв'язку з тим, що нечіткій регулятора визначає приріст управляючої дія як позитивне значення, так і негативне значення, то при синтезі нейрорегулятора необхідно вибрати функції активації нейронів, які приймають значення від -1 до 1. В нашому випадку буде використано гіперболічну тангенціальну функцію (tansig). Така функція дозволяє отримати

на виході значення різних знаків (наприклад, від -1 до 1), що може бути необхідним в системі управління. Графічне представлення функції відображено на рисунку 3.15.

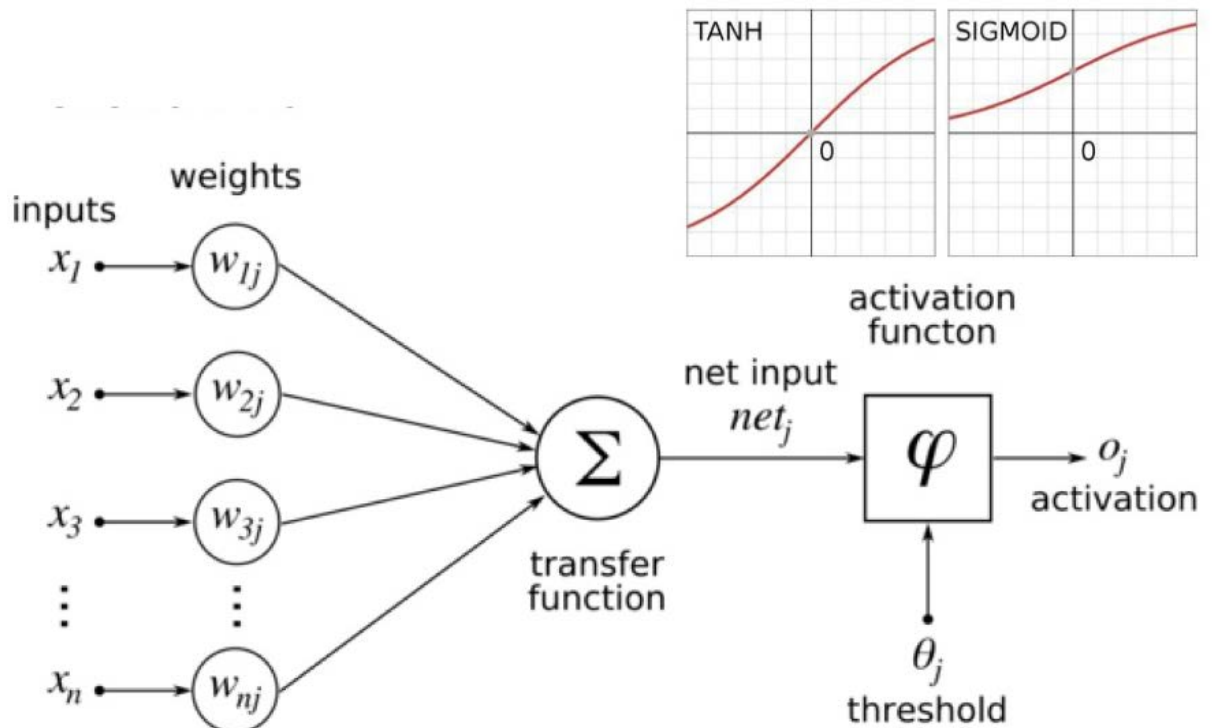


Рис. 3.14 – Структурна схема моделі нейроелемента нейронного регулятора

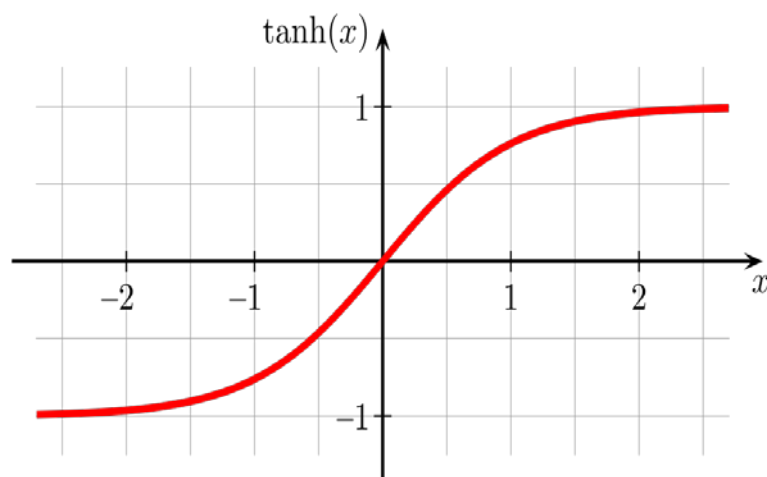


Рис. 3.15 – Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

Аналітично функція записується у наступному вигляді:

$$f(net) = \frac{2}{1 + \exp(-\alpha \cdot net)} - 1, \text{ де } net - \text{вхідний аргумент.}$$

Відомо, що одношарова нейронна мережа має обмежені можливості. Багатошарова чотирьох-шарова вже надлишкова для рішення різних задач. В даному випадку нейрорегулятор буде представлений нейронною мережею з двома шарами, як показано на рисунку 3.16.

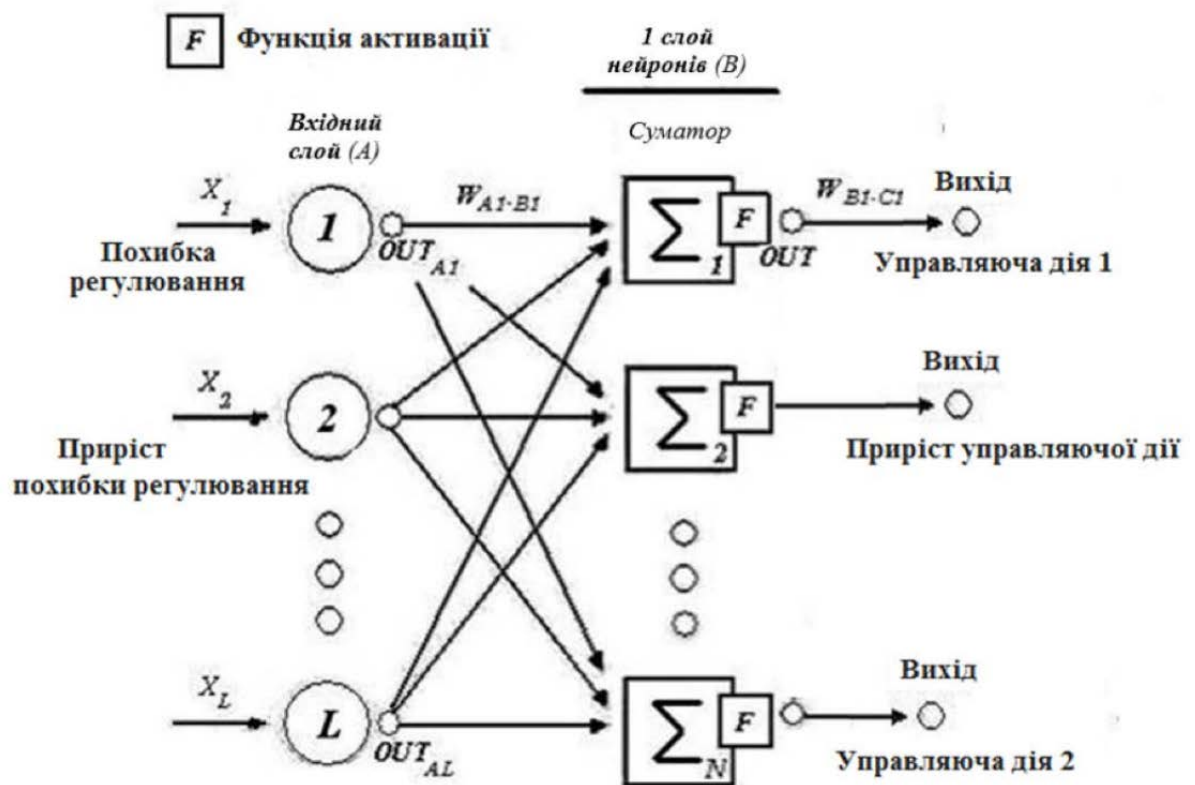


Рис. 3.16 – Одношарова нейронна мережа що виконую функції регулятора нейромережевого алгоритму управління

Складнішими являються багатошарові нейронні мережі. Такі мережі, крім вхідного і вихідного шарів нейронів, характеризуються ще і прихованим шаром (шарами). Зрозуміти їх розташування просто - ці шари знаходяться між вхідним і вихідним шарами.

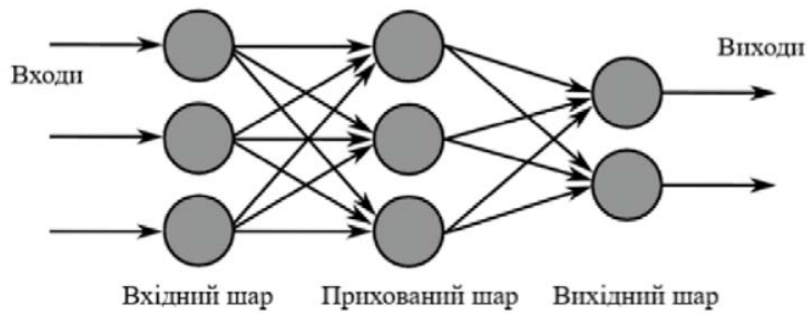


Рис. 3.17 – Багатошарова нейронна мережа

На рисунку 3.18 також зображені похибки на кожному нейроні для коректування ваг за методом зворотного поширення. Якщо така структура буде недостатня, то необхідно буде збільшити кількість нейронів в вхідному шарі мережі та збільшити кількість шарів до трьох.

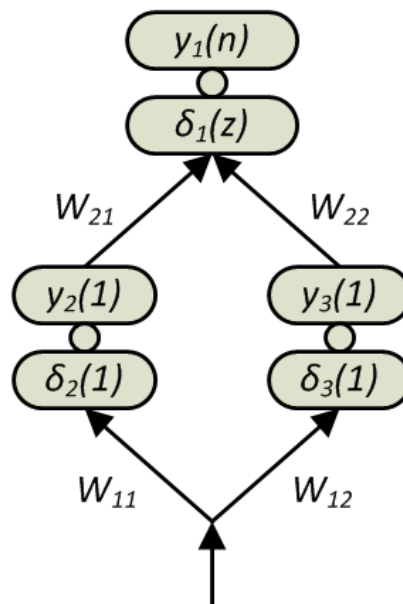


Рис. 3.18 – Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

Для визначення ваг між нейронними з'єднаннями за методом зворотного поширення було використано програмне середовище MATLAB, що дозволяє згенерувати задану нейронну мережу на базі вхідних і вихідних значень сигналів. Таким чином, для тренування нейронної мережі необхідно указати вхідні і вихідні значення сигналів нейрорегулятора, а точніше, значення похибок регулювання та приріст управляючого впливу.

Штучна нейрона мережа, що виконує роль регулятора, синтезується на базі характеристик нечіткого логічного регулятора. Ці характеристики представляються у табличній формі у вигляді вхідних і вихідних значень нечіткого регулятора (таблиця 2). Дані, представлені у таблиці 2, визначені на базі моделювання нечіткого регулятора.

Таблиця 3.2 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

№	l	u	Δu
1	-150	-99,91	-3
2	-100	-62	-1,862
3	-50	-38	-1,138
4	-20	-19,8	0,5678
5	-5	-5,73	-0,1624
6	0	0	0
7	5	6,6	0,162
8	20	22	0,56
9	50	42	1,138
10	100	66,8	1,862
11	150	107	3

Далі створюємо М-файл в середовищі Matlab і в цьому файлі прописуємо команди для створення і навчання нашого нейрорегулятора. Вхідні і вихідні значення нейрорегулятора були отримані на основі характеристик нечіткого логічного регулятора, отриманих на основі схеми моделювання, представленої на рисунку 3.19.

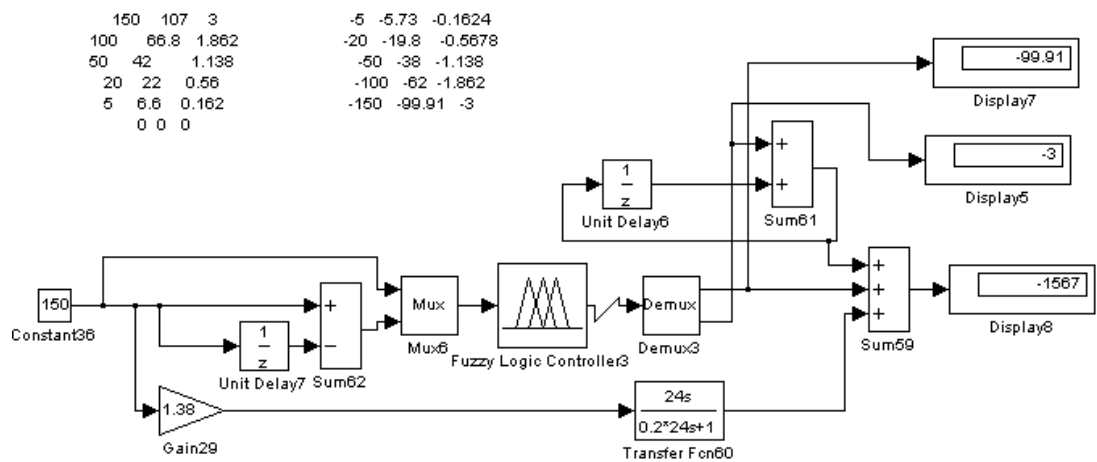


Рисунок. 3.19 – Схема для отримання даних для навчання нейронної мережі

В М-файлі було записано виконавчий код, що представлений на рисунках 3.20 і 3.21 відповідно для інтегральної та пропорційної складової регулятора. Представлений виконавчий код також можливо записати у командній строчці Matlab – command window, в результаті чого згенерується відповідна нейронна мережа.

В даному виконавчому коді p – вхідні значення нейромережі (похибка регулювання), t – відповідне значення виходу нейромережі. На третій строчці задаємо діапазон, кількість шарів нейромережі та функції активації. Також задаємо кількість кроків тренування, команду тренування нейромережі та генерації.

```

» P=[-150 -50 -20 -5 0 5 20 50 150];
» t=[-0.099 -0.038 -0.0198 -0.00573 0 0.0066 0.022 0.042 0.107];
» net=newff([-150 150], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=50;
» net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/50, MSE 0.166375/0, Gradient 77.6558/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/50, MSE 5.33335e-006/0, Gradient 0.001229/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/50, MSE 4.61313e-006/0, Gradient 0.000213456/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, P)

a =

Columns 1 through 7

-0.0989 -0.0396 -0.0165 -0.0040 0.0003 0.0047 0.0180

Columns 8 through 9

0.0443 0.1069

» gensim(net)

```

Рис. 3.20 – Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює пропорційну складову нейрорегулятора

```

0.1078 0.3016

» P=[-150 -50 -20 -5 0 5 20 50 150];
» t=[-0.3 -0.13 -0.056 -0.0162 0 -0.0162 0.056 0.1138 0.3];
» net=newff([-150 150], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=150;
» net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/150, MSE 0.661548/0, Gradient 73.3451/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/150, MSE 0.000530009/0, Gradient 0.069316/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/150, MSE 0.000253579/0, Gradient 0.0149362/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/150, MSE 0.00017385/0, Gradient 0.0210847/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/150, MSE 0.000112647/0, Gradient 0.290227/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/150, MSE 7.73872e-005/0, Gradient 0.0030408/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/150, MSE 7.71378e-005/0, Gradient 0.005223/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, P)

a =

Columns 1 through 7

-0.2999 -0.1301 -0.0581 -0.0197 -0.0068 0.0062 0.0447

Columns 8 through 9

0.1151 0.3000

» gensim(net)
»
Warning: Unconnected line found in: 'B1'.

<

```

Рис. 3.21 – Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює інтегральну складову нейрорегулятора

Характеристики точності навчання показані на рисунку 3.22, з яких можливо побачити, що десь на 40-м кроці навчання коректування ваг між нейронними з'єднаннями було закінчено.

Водночас з генерацією НМ в головному вікні Matlab відображаються фактичні значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону мережі. На рисунках 3.23 та 3.24 зображено бажані та фактичні значення вихідного сигналу і-того вихідного нейрону НМ, що відтворює І – складову та ІІ – складову нейрорегулятора тиску газу окремо.

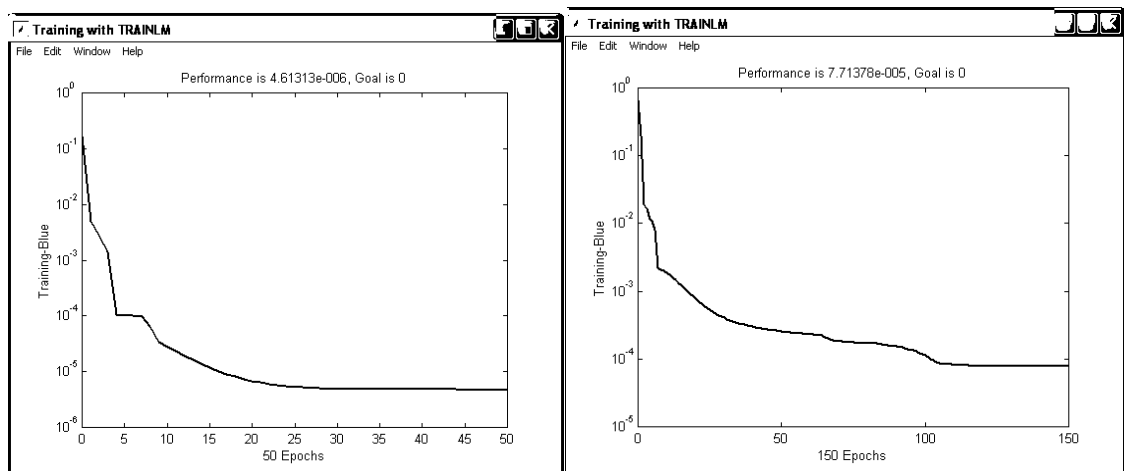


Рис. 3.22 – Характеристика точності навчання пропорційної та інтегральної складової нейрорегулятора

Фактичні значення:									
-0.3	-0.13	-0.056	-0.0162	0	-0.0162	0.056	0.1138	0.3	0
Бажані значення:									
-0.2999	-0.1301	-0.0581	-0.0197	-0.0068	0.0062	0.0447	0.1151	0.3000	0

Рис. 3.23 – Бажані та фактичні значення вих. сигналу і-того вихідного нейрону НМ, що відтворює І – складову нейрорегулятора

Фактичні значення:									
-0.099	-0.038	-0.0198	-0.00573	0	0.0066	0.022	0.042	0.107	0
Бажані значення:									
-0.0989	-0.0396	-0.0165	-0.0040	0.0003	0.0047	0.0180	0.0443	0.1069	0

Рис. 3.24 – Бажані та фактичні значення вих. сигналу і-того вихідного нейрону НМ, що відтворює ІІ – складову нейрорегулятора

Виходячи з цих даних, представлених на рисунках 3.23 та 3.24, розрахуємо похибки для вихідного шару та похибки для i -тих нейронів прихованого шару НМ за методом зворотного поширення для оцінки якості тренування нейронної мережі.

Згідно навчанню штучної нейронної мережі за методом зворотного розповсюдження похибки, похибка для вихідного шару нейронної мережі визначається за наступною формулою (1):

$$\delta_i(n) = (y_i(n) - d_i) \cdot y_i(n) \cdot (1 - y_i(n)) \quad (1)$$

де d_i – бажане значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону мережі.

y_i – фактичне значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону мережі.

Похибка для i -того нейрону прихованого шару розраховується за наступною формулою (2):

$$\delta_i(n) = y_i(n) \cdot (y_i(n) - d_i) \cdot \sum w_{in+1} \cdot \delta_i(n+1) \quad (2)$$

де w_{in+1} – вага міжнейронного з'єднання $n+1$ шару; $\delta_i(n+1)$ – похибка i -того нейрону $n+1$ шару.

Таким чином, розрахунок похибок для I – складової нейрорегулятора наступний:

Розрахунок помилки вихідного шару згідно з рисунку 3.23:

$$\begin{aligned} \delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n)(1 - y_1(n)) = \\ &= (-0.0162 - -0.0197) * (-0.0162) * (1 - -0.0162) = 0.00000085 \end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned} \delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = \\ &= 0.7543 * (1 - 0.7543) * (-0.090802279331460109) * 0.00000085 = \\ &= -0.0000000143 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= 0.5327 * (1 - 0.5327) * (-0.1663176858009808) * 0.00000085 = \\ &= 0.0000000351\end{aligned}$$

Розрахунок помилок для П – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\begin{aligned}\delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n) * (1 - y_1(n)) = \\ &= (-0.0198 - -0.0165) * (-0.0198) * (1 - -0.0198) = 0.0333\end{aligned}$$

Розрахунок помилки для і-тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned}\delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = \\ &= 0.9599 * (1 - 0.9599) * 7.3655548636428527 * 0.0333 = 0.009443 \\ \delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= 0.9766 * (1 - 0.9766) * (-7.3307275810928836) * 0.0333 = -0.005578\end{aligned}$$

Результати розрахунків показали, що помилки практично нульові, отже ними можна знехтувати, а розрахунок значень наведеної погрішності не проводити.

Сформовані нейроні мережі були визначені у схемі моделювання замість нечіткого регулятора, як показано на рисунку 3.25. У такий спосіб була синтезована модель САУ з нейрорегулятором засобами середовища MATLAB\Simulink, фрагмент структурної схеми якої представлений на рисунку 3.25.

На основі даних параметрів сформованої нейронної мережі була визначена схема нейрорегулятора у середовищі MATLAB\Simulink. Схема нейрорегулятора, що представлена на рисунку 3.26, є розгорнутою схемою, що представлена на попередньому рисунку 3.25.

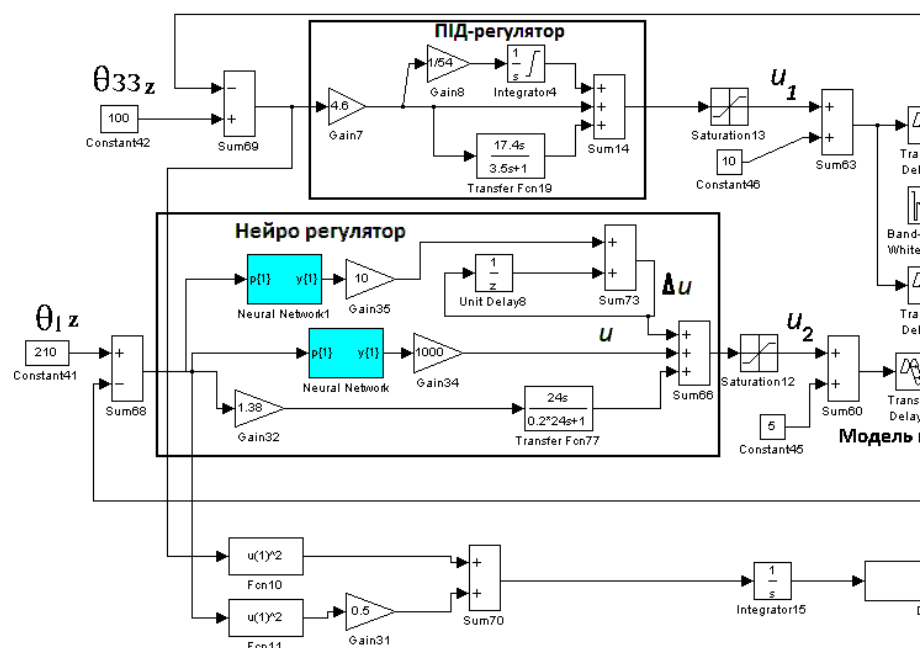


Рис. 3.25 – Фрагмент структурної схеми моделі САУ з нейрорегулятором яка представлена засобами середовища MATLAB\Simulink

У результаті моделювання САУ з нейрорегулятором були отримані графіки перехідних процесів при тих же умовах, які були при моделюванні САУ з нечітким регулятором та традиційним ПІД-регулятором. Ці графіки представлені на рисунку 3.27. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором працює незначно гірше, ніж САУ з нечітким регулятором.

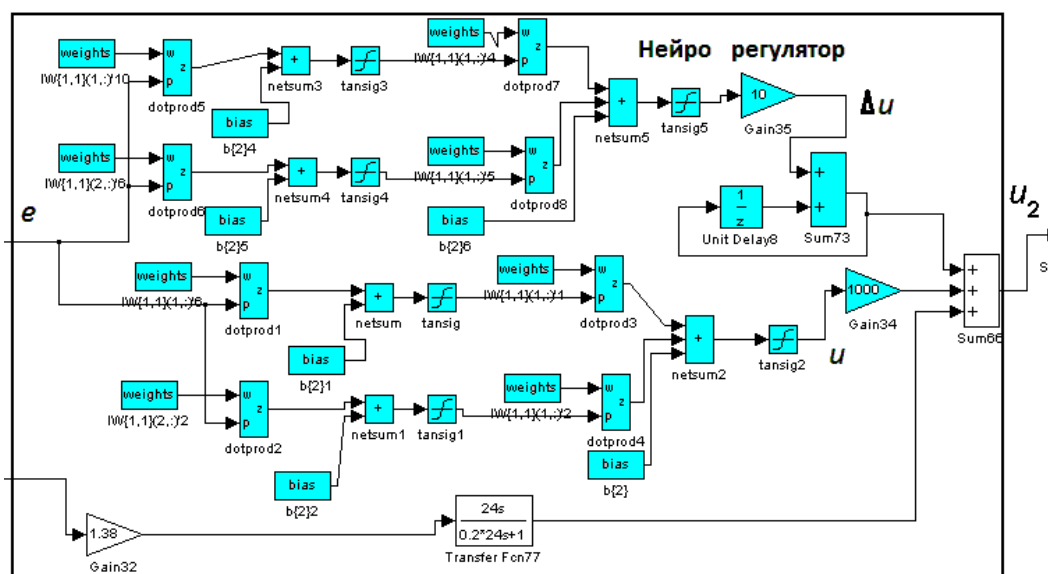


Рис. 3.26 – Схема моделювання нейронного регулятора

Час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування складає 15 секунд при САУ з нечітким та традиційним ПД регулятором, і 17 секунд, при САУ з нейронним регулятором. Також максимальне динамічне відхилення при детермінованому, що збурює, значно більше в САУ з нейрорегулятором, як показано на рисунку 3.27. Незважаючи на це регулятор, що синтезований на базі штучних нейронних мереж, має 8-м ваг між нейронних з'єднань, а саме параметри які можна оптимізувати для покращення якості регулювання. Також, як видно з рисунку 3.28, є шість зміщень, які також можливо оптимізувати.

Можливо зробити висновок, що виходячи з якості регулювання різних САУ необхідно нейрорегулятор оптимізувати при тих же умовах, як і попередній традиційний ПД-регулятор для визначення остаточного висновку про доцільність застосування різних САУ.

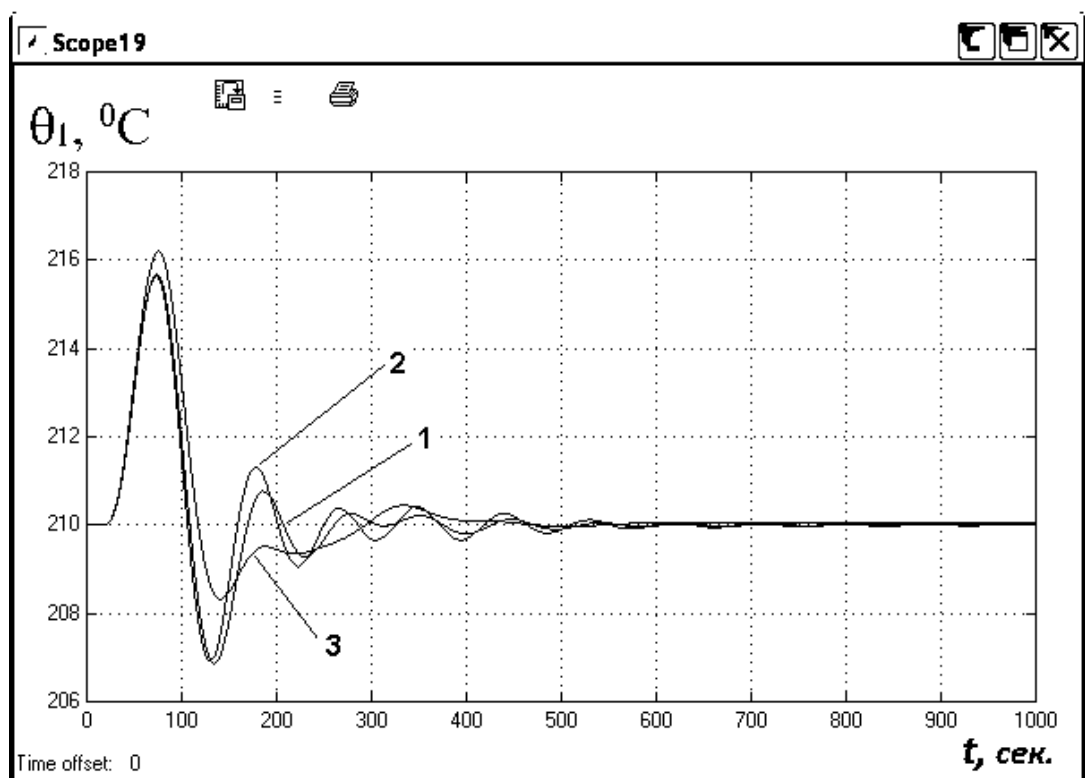


Рис. 3.27 – Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором з висновком Сугено -0; графік 3 – перехідний процес у САУ з регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж

Для покращення якості регулювання у роботі була проведена параметрична оптимізація САУ з нейронним регулятором. Оптимізувались чотири параметри настроювання нейрорегуляторів – це вагові коефіцієнти нейронних з'єднань першого-вхідного шару штучної нейронної мережі. Оптимізація нейронного регулятора проводилась при таких же умовах, які були при оптимізації САУ з традиційним ПІД регулятором. Таким чином, інтегральний показник якості функціонування при оптимізації був обраний відповідно таким же, як при оптимізації САУ з традиційним ПІД регулятором. У програмному середовищі MATLAB\Simulink 5.2 була визначена модель САУ з нейрорегулятором і параметричним оптимізатором, фрагмент структурної схеми якої відображено на рисунку 3.28.

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, а також оптимальні визначені ваги міжнейронних з'єднань першого шару нейронної мережі. Графіки відповідних перехідних процесів та значення вагових коефіцієнтів представлені у відповідному вікні результатів оптимізації, представленою на рисунку 3.29. На рисунку 3.30 представлений результат оптимізації, який був отриманий при декількох попередніх процесах оптимізації при визначеному інтегральному критерії якості роботи системи.

Таким чином можливо ще покращити роботу нейрорегулятора за якістю функціонування, ще далі оптимізувавши обрані вагові коефіцієнти, а також вагові коефіцієнти між нейронних з'єднань вихідного шару нейронної мережі.

Результати параметричної оптимізації показують, що нейрорегулятор на відмінність від традиційного нечіткого регулятора, має велику можливість налаштування під обраний об'єкт з нелінійною статичною характеристикою каналів регулювання. Для визначення принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора необхідно визначити, чи не втрачає стійкість САУ при різних параметрах системи, які можуть бути відхилені від визначених на етапі розробки моделі у діапазоні $\pm 20\%$.

Таким чином, після параметричної оптимізації була перевірена система на грубість для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора САУ (рисунок 3.30.1). На рисунку 3.30.2 представлений результат перевірки на грубість при відхиленні відповідних параметрів в діапазоні $\pm 15\%$.

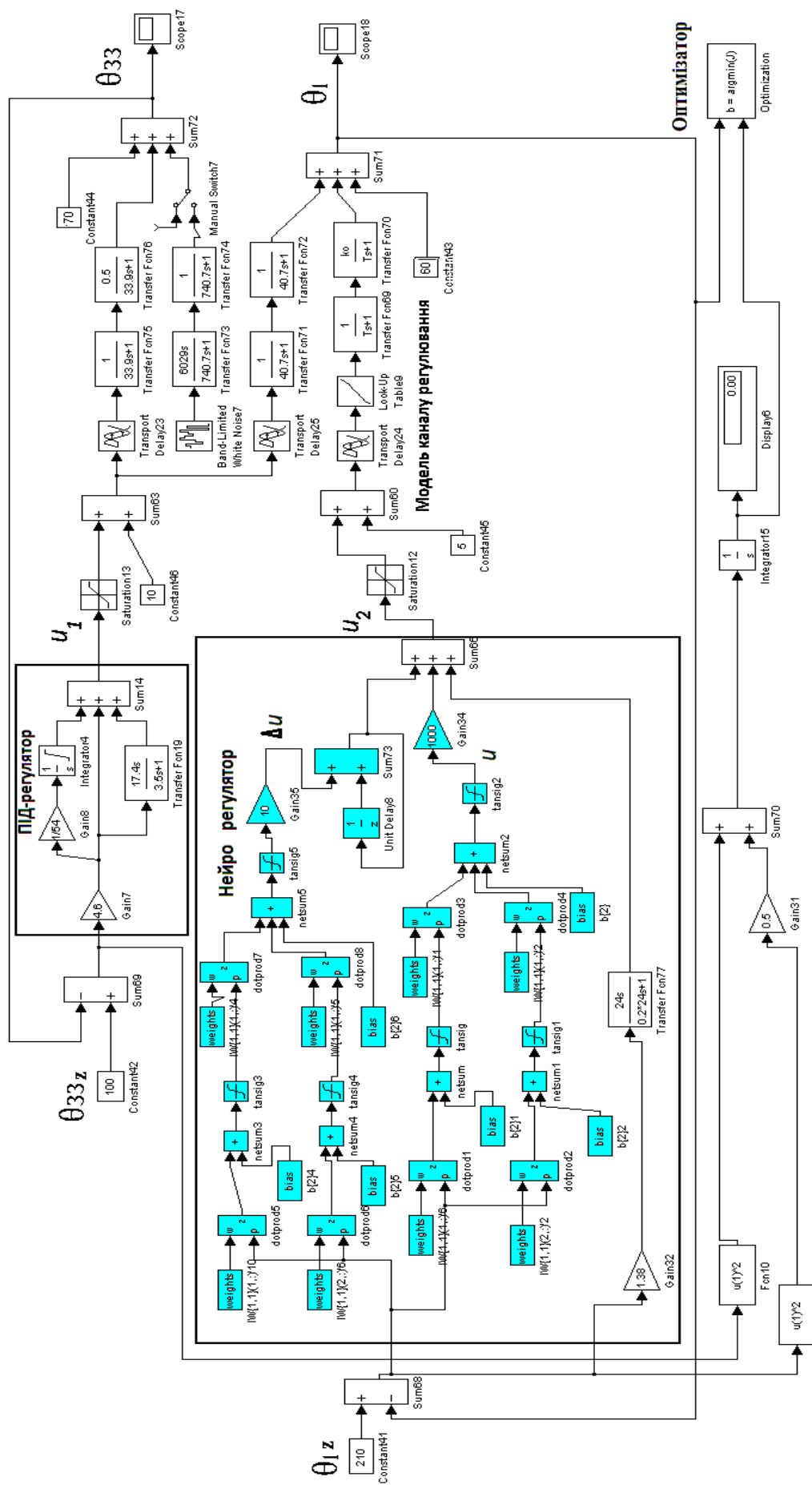


Рис. 3.28 – Фрагмент структурної схеми моделі САУ з нейронним регулятором і параметричним оптимізатором, що реалізована засобами MATLAB\Simulink для визначення оптимальних параметрів системи управління за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання

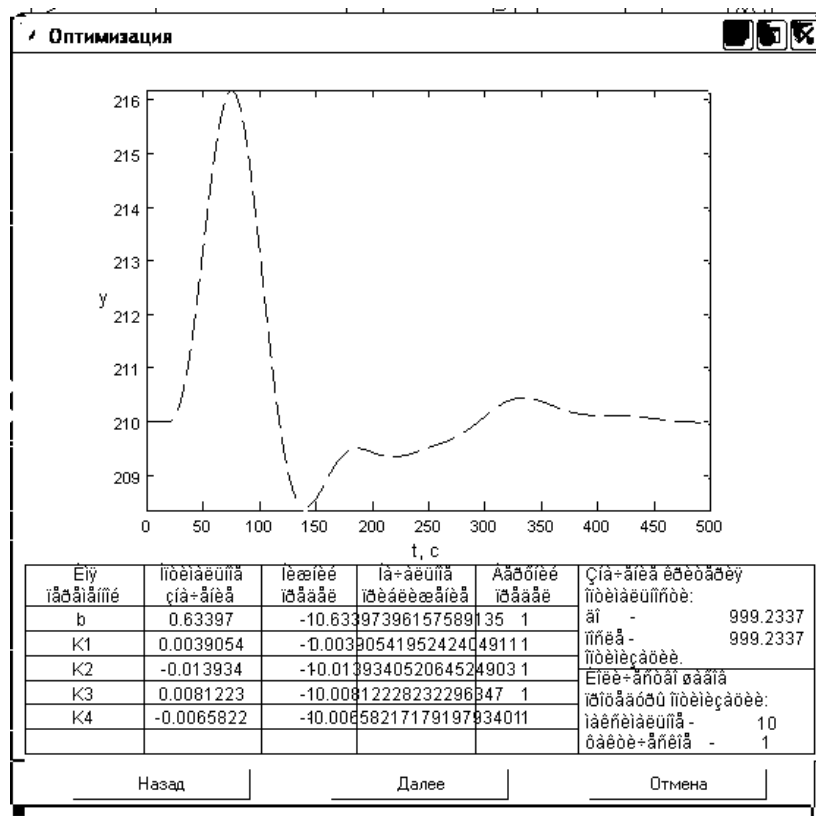


Рис. 3.29 – Вікно оптимізатора до початку оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного управління

Оптимізація параметрів нейрорегулятора була виконана поетапно.

На першому етапі було отримані перехідні процеси до початку оптимізації з відповідними значеннями критерію якості роботи системи. В нейрорегуляторі є вісім коефіцієнтів міжнейронних з'єднень та шість відповідних зміщень. Перший шар нейронної мережі може бути оптимізований на першому етапі. На другому етапі можуть бути оптимізовані параметри другого шару нейронної мережі.

Результати перевірки системи на грубість за допомогою відповідного програмного забезпечення, вбудованого в середовище MATLAB\Simulink, показав, що система втрачає стійкість при значно різних параметрах у діапазоні +/- 20 %. Отже синтезований нейрорегулятор можливо перетворити у відповідний код – програму для визначеного промислового контролера для практичного застосування його у відповідній системі управління.

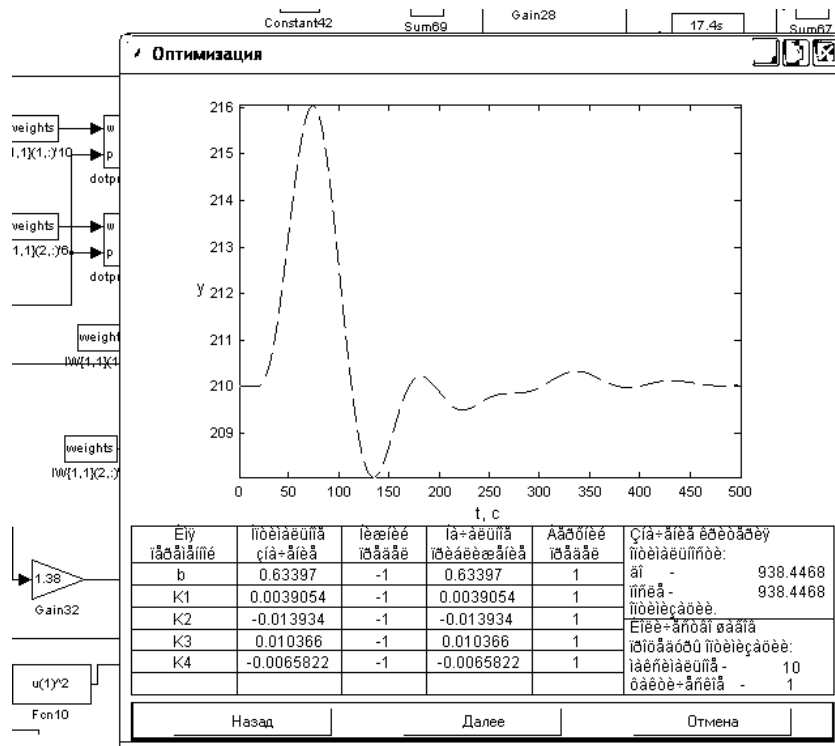


Рис. 3.30 – Вікно результатів оптимізації параметрів регулятора, представленого штучною нейронною мережею, системи автоматичного управління

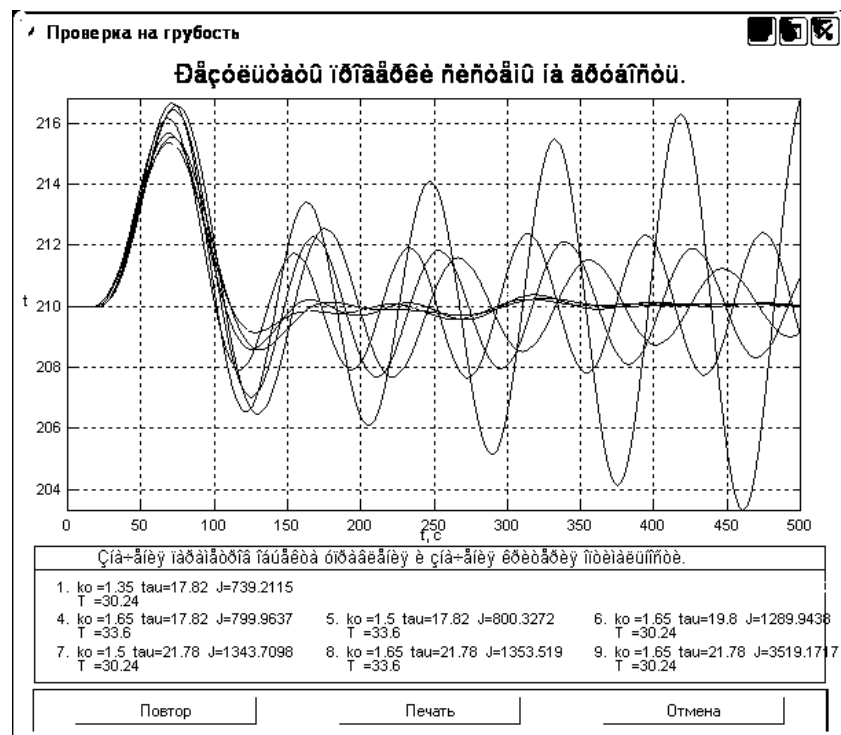


Рис. 3.30.1 – Результати перевірки САР з нейрорегулятором на грубість

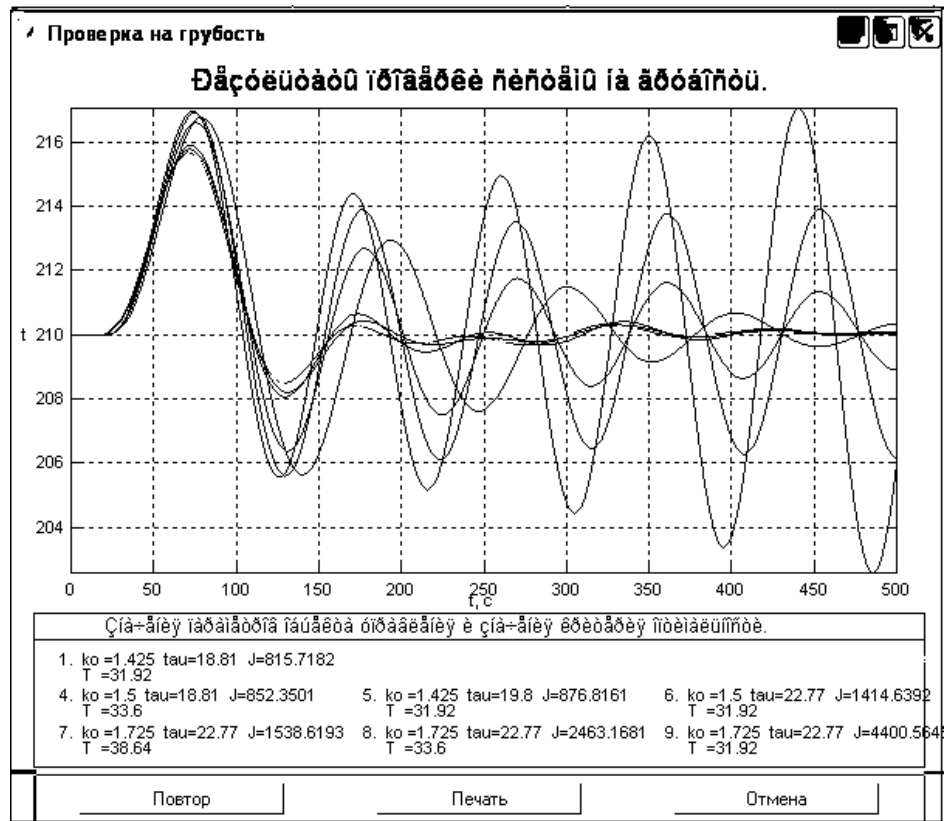


Рис. 3.30.2 – Результати перевірки САР з нейрорегулятором на грубість

3.6 Аналіз результатів функціонування САУ з традиційним регулятором, з регулятором побудованим на базі апарату нечіткої логіки і з нейронним регулятором

На заключному етапі розробки САУ був виконаний порівняльний аналіз функціонування різних САУ за якістю регулювання. У результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів різних САУ за виходом системи на номінальний режим функціонування, що показані на рисунку 3.27. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування значно менший при САУ з регулятором, що представлений на базі штучної нейронної мережі.

Також на основі аналізатора імовірнісних характеристик, що був вбудований у середовище MATLAB\Simulink, була визначена якість

регулювання різних САУ при випадкових впливах що збурюють. У даному випадку порівнюються середні квадратичні відхилення значень похибки регулювання різних САУ при випадкових впливах. Результати представлені на рисунку 3.31, у якому зображене вікно результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень похибки регулювання при різних САУ.

З рисунку 3.31 можливо побачити, що за середньо квадратичним відхиленням САУ з традиційним ПД-регулятором і САУ з нейронним регулятором практично функціонують ідентично, а САУ з нечітким регулятором незначно гірше. В кінцевому випадку показники функціонування різних САУ за якістю регулювання були зведені до таблиці 3.3.

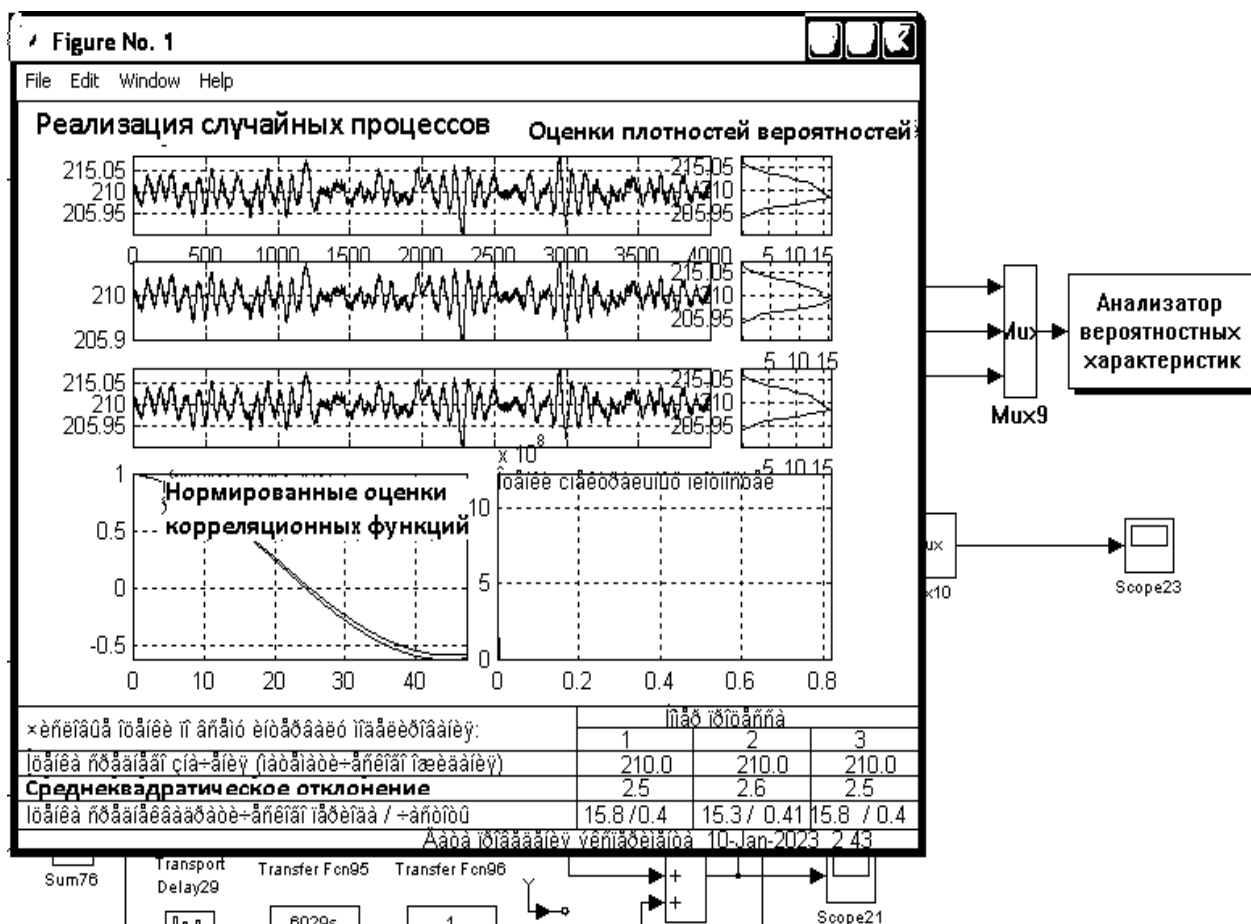


Рис. 3.31 – Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик

Таблиця 3.3 – Показники якості регулювання різних САУ

САУ	САУ з традиційним ПІД-регулятором	САУ з нечітким регулятором	САУ з регулятором, представленим штучною нейронною мережею
Час регулювання	≈350	≈350	≈350
Максимальне динамічне відхилення	≈5.5	≈6	≈5.5
Інтегральний показник	925	944	919
Математичне очікування	210	210	210
Середньоквадратичне відхилення	2,5	2,6	2,5

З таблиці 3.3 можливо зробити остаточний висновок, що за якістю регулювання САУ з нейронним регулятором незначно краще функціонує, ніж інші розглянуті САУ. САУ з традиційним ПІД-регулятором і САУ з нечітким регулятором функціонують за якістю регулювання практично ідентично при об'єкті з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

3.7 Висновки за розділом

В процесі виконання роботи була розроблена модель САУ з нечітким регулятором. Нечіткий регулятор розроблений у відповідному редакторі середовища MATLAB\Simulink. Були визначені функції приналежності до нечітких множин, сформована база правил функціонування регулятора у табличному вигляді та у вікні відповідного редактора, визначений алгоритм нечіткого виводу – Сугено 0-порядку. Було встановлено, що за якістю регулювання така САУ функціонує незначно гірше, ніж САУ з традиційним ПІД-регулятором при об'єкті управління з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Для подальшої параметричної оптимізації САУ, за характеристиками нечіткого регулятора було виконано тренування визначеної штучної нейронної мережі, яка може виконувати роль нейрорегулятора. Тренування штучної нейронної мережі було виконано також засобами середовища MATLAB\Simulink за відповідним виконавчим кодом. Була розроблена модель САУ з регулятором, що представляється штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором були проведена при тих же умовах, що і САУ з традиційним ПД-регулятором.

У результаті моделювання різних САУ було встановлено, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором функціонує незначно краще, ніж інші САУ, це за інтегральним показником якості регулювання - відповідно 919 при САУ з нейрорегулятором і 925 при САУ з традиційним ПД-регулятором.

Таким чином, на основі виконаного синтезу і аналізу різних САУ можна зробити заключний висновок, що нейрорегулятор має принципову придатність для практичного використання на базі промислового контролера при об'єктах управління з нелінійними характеристиками за каналам регулювання.

РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ І ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

4.1 Існуюча програмно-технічна структура підсистеми управління процесом випічки хліба і формулювання задач по її розвитку для впровадження розробок

Відповідно до технологічної схеми та функцій які повинна реалізовувати система керування була складена таблиця (табл. 4.1) зі списком параметрів які повинні вводитись і виводитись з контролера.

Таблиця № 4.1 – Список параметрів що вводяться та виводяться з
контролеру

№ пп	Назва параметра	Умовне позначення	Вид сигналу A/D	Тип сигналу I/O	Діапазон сигналу на вході/виході контролера	Позначення на схемі
1	Температура топкових газів	Θ топ.газ	A	I	(4-20 мА)	1AI
2	Температура зони зволоження	Θ зон.звол	A	I	(4-20 мА)	2AI
3	Температура в зоні випікання 1	Θ зон.1	A	I	(4-20 мА)	3AI
4	Температура в зоні випікання 2	Θ зон.2	A	I	(4-20 мА)	4AI
5	Вологість зони зволоження	Mзон.звол	A	I	(4-20 мА)	5AI
6	Положення РО 1	GE1	A	I	(4-20 мА)	6AI
7	Положення РО 2	GE2	A	I	(4-20 мА)	7AI
8	Положення РО 3	GE3	A	I	(4-20 мА)	8AI
9	Сигнал з додаткового контакту пускача M1	KM1	D	I	0;24В	1DI
10	Сигнал з додаткового контакту пускача M2	KM2	D	I	0;24В	2DI

11	Сигнал з додаткового контакту пускача М3	KM3	D	I	0;24В	3DI
12	Сигнал з додаткового контакту пускача М4	KM4	D	I	0;24В	4DI
13	Сигнал з додаткового контакту пускача М5	KM5	D	I	0;24В	5DI
14	Пуск Вентилятора В1(М1)	C_M1	D	O	0;24В	1DO
15	Пуск Вентилятора В2(М2)	C_M2	D	O	0;24В	2DO
16	Пуск Вентилятора В3(М3)	C_M3	D	O	0;24В	3DO
17	Пуск Вентилятора В4(М4)	C_M4	D	O	0;24В	4DO
18	Пуск Транспортера (М5)	C_M5	D	O	0;24В	5DO
19	Керування клапаном газу	KLg	D	O	0;24В	6DO
20	Тиск пари в паропроводі	P_par	D	I	0;24В	6DI
21	Тиск газу в газопроводі	P_gaz	D	I	0;24В	7DI
22	Розрідження в топці	P_r	D	I	0;24В	8DI
23	Контроль факелу	BS1	D	I	0;24В	9DI
24	Управляюча дія на ступінь відкриття клапану подачі пари в зону зволоження	U_par	A	O	(4-20 мА)	1AO

25	Управляюча дія на ступінь відкриття засувки подачі повітря в зону 1 випічки	U_v	A	O	(4-20 мА)	2АО
26	Сигнал керування звуковою сигналізацією	ZS	D	O	«відкритий колектор»	7DO

Виходячи з сформованої таблиці з переліком входів-виходів системи керування та середньої складності алгоритмів керування технічну структуру системи управління розробимо на базі контролера фірми Siemens - Simatic S7-300. Для реалізації системи керування в модулях ПЗО контролера повинні бути передбачені: 8 - аналогових входів, 2 - аналогових виходи, 9 – дискретних входів і 7 дискретних виходів. Для реалізації системи керування скористаємося контролером CPU 313C-2DP з модулями ПЗО SM 331 - AI8, SM 332 - AO4.



Рис. 4.1 – CPU 313C-2DP

Компактний центральний процесор CPU 313C-2DP (6ES7 313-6CG04-0AB0) CPU 313C-2 DP характеризується наступними показниками:

- Мікропроцесор; 100-200 нс на виконання бінарної інструкції. Робоча пам'ять об'ємом 64 Кбайт, RAM (приблизно 20 К інструкцій); для виконання завантаженої секції програми та зберігання оперативних даних.
- Гнучкі можливості розширення; підключення до 31 модуля S7-300 (4-рядна конфігурація).
- Інтерфейс MPI; дозволяє встановлювати одночасно до 8 з'єднань з програмованими контролерами S7-300/400, програматорами, комп'ютерами та панелями операторів.
- Набір вбудованих входів і виходів; 16 дискретних входів = 24В і 16 дискретних виходів = 24В/0.5А .

Таблиця. 4.2 — Технічні дані входів/виходів CPU

Центральні процесори S7-300C	CPU 312C	CPU 313C-2 PtP	CPU 313C-2 DP
<i>Вбудовані дискретні входи</i>			
Кількість вхідних каналів:			
• загальне	10	16	16
• використовуване технологічними функціями	8	12	12
Адреса входів, які встановлюються за замовчуванням	DI124.0 ... DI125.1	DI124.0 ... DI125.7	DI124.0 ... DI125.7
Кількість вхідних сигналів, які одночасно фіксуються тригерами:			
• горизонтальна установка:			
- при температурі до 40°C	10	16	16
- при температурі до 60°C	5	8	8
• вертикальна установка:			
- при температурі до 40°C	5	8	8
Гальванічне розділення: ніє :			
• між каналами та внутрішньою шиною контролера	Є	Є	Є
• між каналами	Немає =75В/~60В	Немає =75В/~60В	Немає =75В/~60В
Допустима різниця потенціалів між різноманітними цілями			
Випробування напруги ізоляції	=500В	=500В	=500В
Струм, споживаний з ланцюга L+ при холостому ході	Нет	70мА	70мА
Індикація стану вхідних сигналів	1 зелений світлодіод на кожний канал		
Підтримка переривання	• для каналів сконфігурованих для роботи в режимі • при використанні технологічних функцій (див. опис) • не використовуються для стандартних дискретних входів • для технологічних функцій (див. опис технологіч.)		
Діагностичні функції			
Вхідна напруга			
• номінальне значення	=24В	=24В	=24В
• логічної одиниці	15...30В	15...30В	15...30В
• логічного нуля	-3...+5В	-3...+5В	-3...+5В
• захист від неправильної полярності напруги	Є	Є	Є
Вхідний струм логічної одиниці	9мА	9мА	9мА
Затримка поширення вхідного сигналу при номінальній вхідній напрузі			

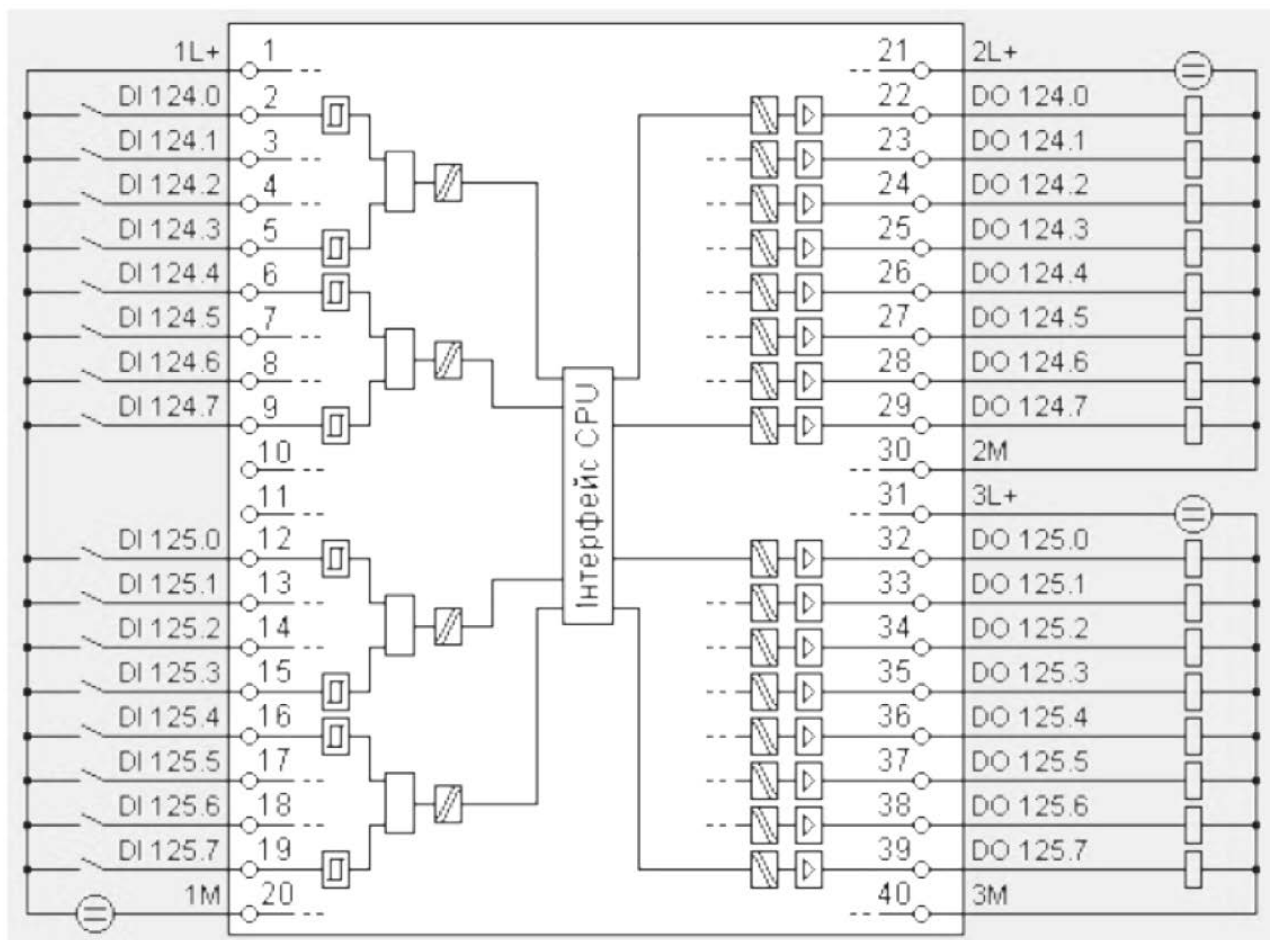


Рис. 4.2 – Схеми зовнішніх підключень CPU 313C-2DP

Рекомендації щодо підключення дискретних сигналів. У тих випадках, коли від контакторів приходять сигнали ~ 220 В змінного струму, то для їхнього перетворення в сигнали ≈ 24 В постійного струму слід використовувати інтерфейсні реле, наприклад, фірми Relpol.

Для захисту вихідних ланцюгів модулів дискретного виходу від індуктивних перенапруг, які виникають при відключенні індуктивностей (катушок реле й контакторів), при монтажі слід керуватися наступними рекомендаціями:

Схеми захисту для котушок, що обтікають постійним струмом

До котушок, що обтікають постійним струмом, паралельно підключається, як зображено на наступному малюнку, діод або стабілітрон.



Рис. - Схема захисту для котушок, що обтікають постійним струмом

- ① з діодом
- ② зі стабілізатором

Схема з діодом/стабілітроном має наступні властивості:

- Можна повністю уникнути перенапруження які зв'язані з відключеннями. Стабілітрон допускає більш високу напругу, що відключається
- Більша затримка відключення (в 6-10 раз більше, ніж без захисної схеми). Схема зі стабілітроном забезпечує більш швидке відключення, ніж схема з діодом.

Схема для котушок, що обтікають змінним струмом

До котушок що обтікають змінним струмом паралельно підключають як показано на наступному малюнку варистор або RC-ланцюг

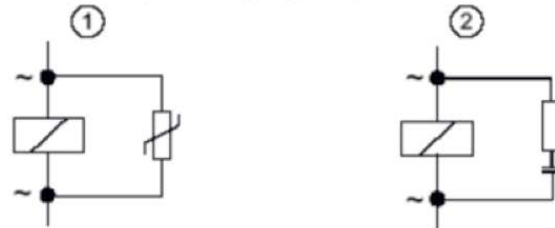


Рис. - Схема захисту для котушок що обтікають змінним струмом

- ① з варистором
- ② з RC-ланцюгом

Схема з варистором має наступні властивості:

- Амплітуда перенапруги, що виникає при відключення, що обмежує, але не демпфірується
- Крутизна перенапруги залишається тією ж самою.
- Затримка відключення незначна.

Схема з RC-ланцюгом має наступні властивості:

- Зменшується амплітуда і крутизна напруги, що виникає при відключенні.
- Затримка відключення незначна.

Рис. 4.3 – Рекомендації Siemens при підключенні дискретних виходів

Для вводу аналогових сигналів було обрано модуль вводу SM 331; AI 8 x 12 Bit (6ES7331-7KF02-0AB0).

Аналоговий модуль вводу SM 331; AI 8 x 12 Bit має наступні властивості:

- 8 входів в 4 групах каналів

- дозвіл вимірюваної величини; встановлюється на групу (в залежно від встановленого часу інтегрування)
- 9 бітів + знак; - 12 бітів + знак; - 14 бітів + знак
- можливість вибору виду вимірювання на групу каналів:
- напруга, струм, опір, температура
- довільний вибір діапазону вимірювань на групу каналів
- параметрізуєме діагностування, два канали з контролем кордонів
- гальванічна розв'язка щодо інтерфейсу з задньої шиною.

На рис 4.4 показані деякі приклади підключення для різних видів вимірювань.

Схема підключення та принципова схема SM 331; AI 8 x 12 Bit

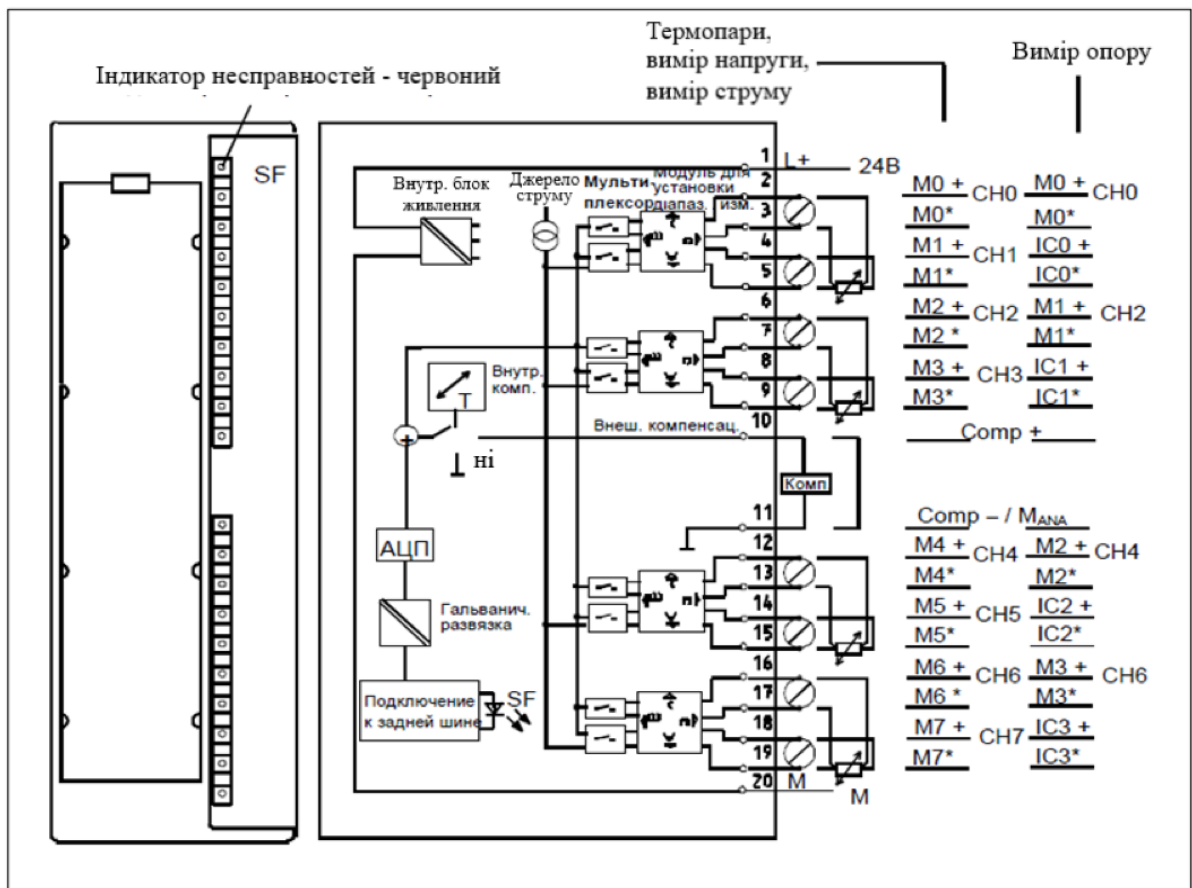


Рис. 4.4 – Схема підключення і принципова схема SM 331; AI 8

У таблицях нижче представлені технічні дані модуля та огляд параметрів, що настраюються.

Таблиця 4.3 – Технічні дані модуля аналогового введення

Технічні дані SM 331; AI 8 x 12 Bit

Розмір та вага	
Розміри ШхВхГ (в міліметрах)	40 x 125 x 117
Вага	ок. 250 г
Особисті данні модуля	
Підтримка режиму тактової синхронізації	Ні
Кількість входів	8
• для датчиків	4
Довжина кабелю	макс. 200 м
• екранованого	макс. 50 м при 80 мВ і для термопар
Напруга, струми, потенціали	
Номінальна напруга живлення електроніки L+	= 24 В
• захист від обраної полярності	Так
Блок живлення вимірювальних перетворювачів	
• струм живлення	макс. 60 мА (на канал)
• стійкість до короткого замикання	Так
Струм постійної величини для датчиків опору	тип. 1_67 мА
Гальванічна розв'язка	
• між каналами та задньою шиною	Так
• між каналами та блоками живлення електроніки	Так
- не для 2-проводного перетворювача	
Допустима різниця потенціалів	
• між входами та M _{ANA} (U _{CM})	2,5 В пост. тока
- при сигналі = 0 В	
• між входами (U _{CM})	2,5 В пост. тока
• між M _{ANA} и M _{Internal} (U _{ISO})	= 75 В / ~ 60 В
Ізоляція перевірена при	= 500 В
Споживання струму	
• з задньої шини	макс. 50 мА
• з джерела живлення навантаження L+	макс. 30 мА (без 2-проводного перетворювача)
Потужність втрат модуля	тип. 1 Вт

Формування аналогових значень					
Принцип виміру	інтегруючий				
Час інтегрування/перетворення/дозволу (на канал)					
• параметризоване	Так				
• час інтегрування в мілісекундах	2,5	16 ² /3	20	100	
• основний час перетворення, що включає час інтегрування в мілісекундах	3	17	22	102	
додатковий час перетворення при виміру опору, в мс або додатковий час перетворення для контролю обриву провoda, в мс або додатковий час перетворення при виміру опору і контролю обриву провoda, в мс	1	1	1	1	
• роздільна здатність в бітах (вкл. область перенавантаження)	10	10	10	10	
• придушення перешкод для частоти f _{1/2} ГЦ	16	16	16	16	
• основний час реакції модуля, в мс (всі канали розблоковані)	9	12	12s	14	
Згладжування вимірювальних значень	400	60	50	10	
	24	136	176	816	
	Ні				

Таблиця 4.4 – Технічні дані модуля аналогового введення для вибору датчиків та виконавчих пристроїв

Придушення перешкод, границя помилок			
Придушення перешкод, $F = n$ ($f_1 \pm 1\%$), (f_1 = частота перешкод)			
• синфазна перешкода ($U_{cm} < 2,5$ В)	> 70 дБ		
• протифазна перешкода (пікове значення перешкоди < номінального значення вхідного діапазону)	> 40 дБ		
Перехрестна перешкода між входами	> 50 дБ		
Границя експлуатаційної помилки (у всьому температурному діапазоні, відносно вхідного діапазону)			
• потенціальний вхід	80 мВ	$\pm 1\%$	
	от 250 до 1000 мВ	$\pm 0,6\%$	
	от 2,5 до 10 В	$\pm 0,8\%$	
• струмовий вхід	от 3,2 до 20 мА	$\pm 0,7\%$	
• опір	150 Ом; 300 Ом; 600 Ом	$\pm 0,7\%$	
• термопар	Тип E, N, J, K, L	$\pm 1,1\%$	
• термометри опору	Pt 100/Ni 100	$\pm 0,7\%$	
	Pt 100 climate	$\pm 0,8\%$	
Основна помилка (гранична експлуатаційна помилка при 25 °C відносно вхідного діапазону)			
• потенціальний вхід	80 мВ	$\pm 0,7\%$	
	от 250 до 1000 мВ	$\pm 0,4\%$	
	2 от 2,5 до 10 В	$\pm 0,6\%$	
• струмовий вхід	от 3,2 до 20 мА	$\pm 0,5\%$	
• опір	150 Ом; 300 Ом; 600 Ом	$\pm 0,5\%$	
• термопар	Тип E, N, J, K, L	$\pm 0,7\%$	
• термометри опору	Pt 100/Ni 100	$\pm 0,5\%$	
	Pt 100 climate	$\pm 0,6\%$	
Температурна помилка (відносно вхідного діапазону)			
Помилка лінеаризації (відносно вхідного діапазону)			
		$\pm 0,05\%$	

Повторюваність (в режимі, що встановився 25 °C відносно вхідного діапазону)			
Температурна помилка внутрішньої компенсації			
$\pm 0,05\%$			
$\pm 1\%$			
Стан, переривання, діагностика			
Переривання			
• апаратне переривання при порушенні граничного значення	Параметризоване канали 0 та 2		
• діагностичне переривання	параметризоване		
Діагностичні функції	параметризоване червоний світлодіод (SF)		
• індикатор групової помилки зчитування	можливо		
• діагностичної інформації			
Данні для вибору датчика			
Вхідний діапазон (номінальне значення)/ вхідний опір			
• напруга	± 80 мВ	/10 МОм	
	± 250 мВ	/10 МОм	
	± 500 мВ	/10 МОм	
	± 1000 мВ	/10 МОм	
	$\pm 2,5$ В	/100 кОм	
	± 5 В	/100 кОм	
	от 1 до 5 В;	/100 кОм	
	± 10 В	/100 кОм	
• струм	$\pm 3,2$ мА	/25 Ом	
	± 10 мА	/25 Ом	
	± 20 мА	/25 Ом	
	от 0 до 20 мА;	/25 Ом	
	от 4 до 20 мА;	/25 Ом	
• опір	150 Ом	/10 МОм	
	300 Ом	/10 МОм	
	600 Ом	/10 МОм	
• термопар	Тип E, N, J, K, L	/10 МОм	
• термометри опору	Pt 100, Ni 100	/10 МОм	
Максимальна вхідна напруга для потенційного входу (руйнівна межа)			
Максимальний вхідний струм для струмового входу (руйнівна межа)			
макс. 20 В тривалість; 75 В протягом макс. 1 с (коефіцієнт заповнення 1:20)			
40 мА			

Для виводу аналогових сигналів було обрано модуль виводу SM 332; АО 4 x 12 Bit (6ES7332-5HD01-0AB0).

Аналоговий модуль виведення SM 332; АО 4 x 12 Bit має наступні властивості:

- 4 вихідних каналу
- окремі вихідні канали можуть бути параметризовані як: потенційні виходи та струмові виходи.
- Роздільна здатність 12 Bit
- параметрізуєма діагностика
- параметрізуєма діагностичне переривання
- гальванічна розв'язка щодо інтерфейсу з задній шиною і напруги на навантаженні.

На рис 4.5 наведена схема підключення модуля аналогового виведення, а у таблицях 4.5 і 4.6 його технічні характеристики.

Схема підключення та принципова схема SM 332; АО 4 x 12 Bit

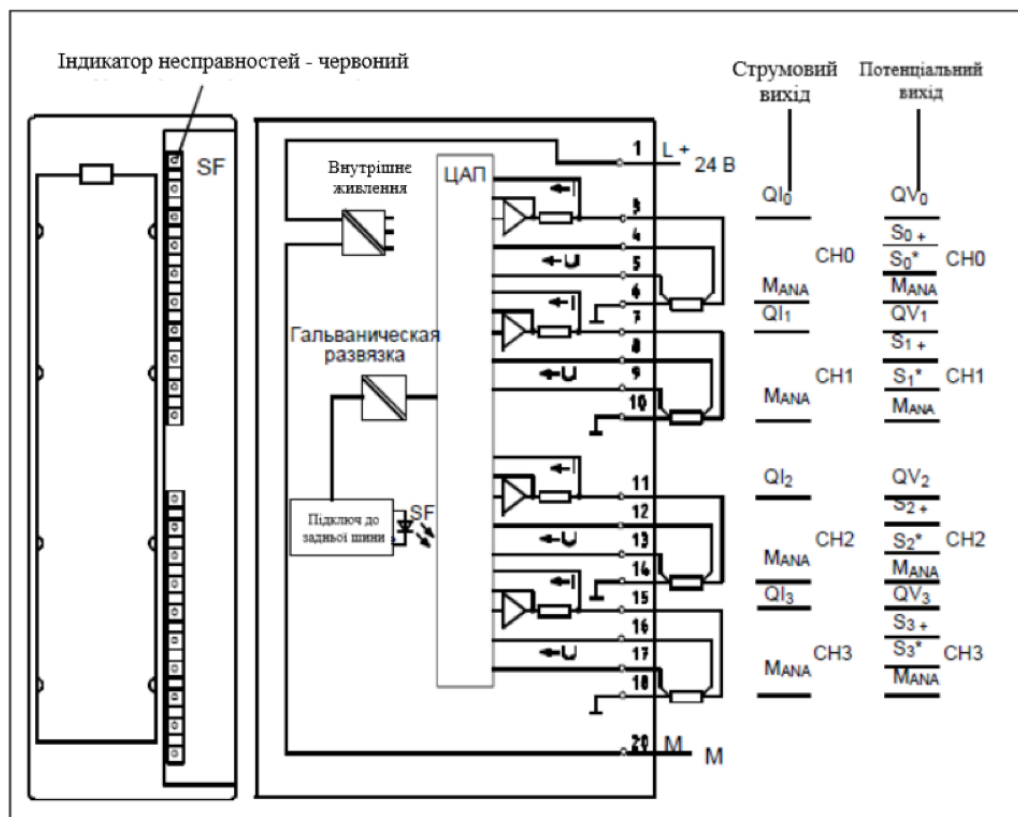


Рис. 4.5 – Зовнішній вигляд і принципова схема аналогового модуля виводу SM 332; АО 4 x 12 Bit.

Таблиця 4.5 – Технічні дані модуля аналогового виведення

Технічні дані: SM 332; АО 4 x 12 Bit

Розмір та вага		Формування аналогових значень	
Розміри ШхВхГ (в міліметрах)	40 x 125 x 117	Роздільна здатність, включаючи знак	
Вага	ок. 220 г	• $\pm 10 \text{ В}; \pm 20 \text{ мА};$	11 битів + знак
Особисті дані модуля		от 4 до 20 мА; от 1 до 5 В	
Підтримка режиму тактової синхронізації	й Ні	• от 0 до 10 В; от 0 до 20 мА	12 битів
Кількість входів	4	Час перетворення (на канал)	макс. 0,8 мс
Довжина кабелю		Час становлення	
• екранованого	макс. 200 м	• для омического навант.	0,2 мс
Напруга, струми, потенціали		• для сместного навант.	3,3 мс
Номинальна напруга на навантаженні L+	= 24 В	• для индуктивного навант.	0,5 мс (1 мГн)
• захист від обраної полярності	Так		3,3 мс (10 мГн)
Гальванічна розв'язка		Придушення перешкод, меж помилки	
• між каналами та шинною	Так	Перекрестна перешкода між виходами	> 40 дБ
• між каналами та блоками живлення електроніки	Так	Границя експлуатаційної помилки (у всьому діапазоні температур, відносно вихідного діапазону)	
• між каналами	Ні	• потенціальні виходи	$\pm 0,5 \%$
• між каналами та напругою на навантаженні L+	Так	• струмові виходи	$\pm 0,6 \%$
Допустима різниця потенціалів		Основна помилка (гранична експлуатаційна помилка при 25° С відносно вихідного діапазону)	
• между S- и M _{ANA} (U _{CM})	= 3 В	• потенціальні виходи	$\pm 0,4 \%$
• между M _{ANA} и M _{tema} (U _{ISO})	= 75 В / ~ 60 В	• струмові виходи	$\pm 0,5 \%$
Ізоляція перевірена при	= 500 В	Температурна помилка (відносно вихідного діапазону)	$\pm 0,002 \%/K$
Споживання струму		Помилка ліанерізації (відносно вихідного діапазону)	$\pm 0,05 \%$
• з шинною	макс. 60 мА	Повторюваність (у встановленому режимі 25° С відносно вихідного діапазону)	$\pm 0,05 \%$
• з джерела живлення навантаження L+(без навант.)	макс. 240 мА	Пульсації на виході; діапазон від 0 до 50 кГц (відносно вихідного діапазону)	$\pm 0,05 \%$
Потужність втрат модуля	тип. 3 Вт	Стан, переривання, діагностика	
		Переривання	
		• діагностичне: переривання	параметризоване
		Діагностичні функції	параметризоване
		• індикатор групової помилки	червоний світлодіод (SF)
		• зчитування діагностичної інформації	можливо
		Можливість примінення замінюючого значення	Так, параметризоване

Аналоговий модуль виведення SM 332; АО 4 x 12 Bit виконує контроль обриву проводу тільки для струмових виходів. Аналоговий модуль виведення SM 332; АО 4 x 12 Bit виконує перевірку на коротке замикання тільки для потенційних виходів.

Таблиця 4.6 – Технічні дані модуля аналогового введення для вибору датчиків та виконавчих пристроїв

Данні для вибору виконавчого пристрою			
Вихідні діапазони (номінальне значення)		Струмий вихід	
• напруга	± 10 В от 0 до 10 В от 1 до 5 В	• напруга холостого ходу	макс. 18 В
• струм	± 20 мА от 0 до 20 мА от 4 до 20 мА	Границя руйнування, що прикладаються ззовні напруг/струмів	
Повний опір (в номінальному вихідному діапазоні)		• напруга на виходах відносно M_{ANA}	макс. 18 В тривалого 75 В в течение макс. 1 с (коефіцієнт заповнення 1:20)
• для потенційних виходів	мін. 1 кОм	• струм	макс. 50 мА пост. струм
- ємностне навантаження	макс. 1 мкФ	Підключення виконавчих пристроїв	
• для струмових виходів	макс. 500 Ом	• для потенційного виходу	МОЖЛИВО
- при $U_{CM} < 1$ В	макс. 600 Ом	- 4-провідне підключення (вимірювальний ланцюг)	
- індуктивне навантаження	макс. 10 мГн	• для струмового виходу	
Потенційний вихід		- 2-провідне підключення	МОЖЛИВО
• захист від короткого замикання	Да		
• струм короткого замикання	макс. 25 мА		

Загальний вигляд розробленої схеми технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування ТП наведено на рис. 4.6.

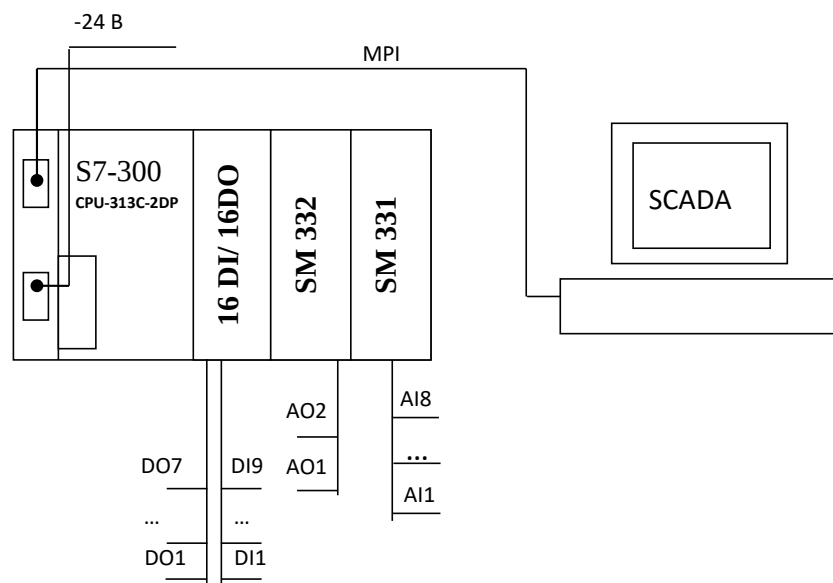


Рис. 4.6 – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи управління ТП

У середовищі Simatic Manager Step7 створюємо проект і додаємо до його складу станцію контролера S7-300. У програмі «Hardware» проводимо

конфігурування обраного контролера і модулів вводу аналогових сигналів SM 331 та виведення аналогових сигналів SM 332. Загальний вид вікна програми «Hardware» з обраним контролером і модулями ПЗО наведено на рисунку 4.7. При конфігуруванні модулі обираються з каталогу елементів, що входить в програму «Hardware».

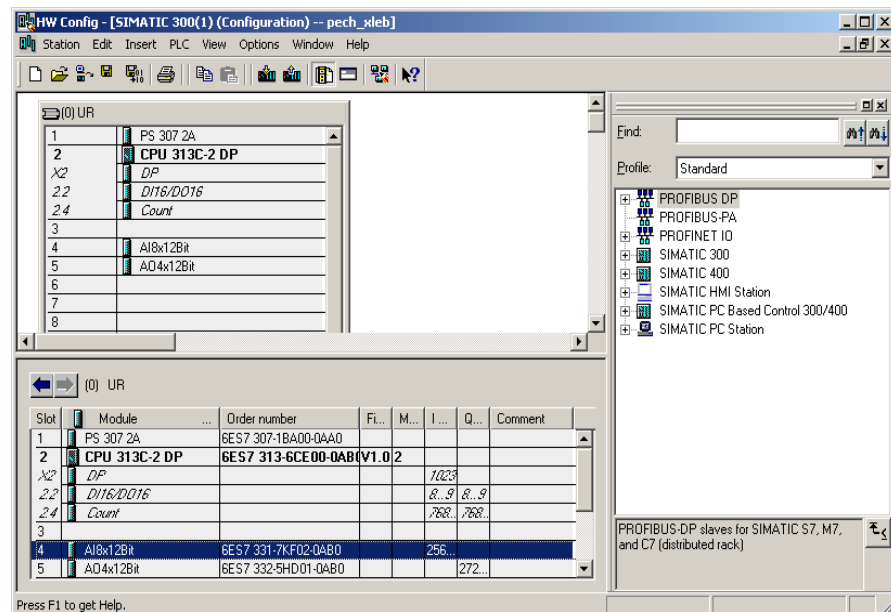


Рис. 4.7 – Загальний вид вікна програми «Hardware»

В розділах 2 і 3 даної роботи існуюча система керування була доповнена алгоритмами підвищення динамічної точності контуру регулювання розрядження у топці котла. Інтегровані алгоритми не потребує істотного збільшення обчислюваних ресурсів. Введення поточного значення витрат газу через аналоговий вхід вже передбачено у контролері. Тому технічну структуру системи керування змінювати не потрібно і можна залишити в існуючому виді.

4.2 Розробка, налаштування і тестування прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритмів управління

Прикладне програмне забезпечення, що реалізує розроблені у середовищі Simulink системи Matlab алгоритми керування може реалізовуватись безпосередньо у середовищі Simatic Step 7 з використанням

стандартних мов програмування контролерів. Наприклад мовами STL і SCL. Для цього потрібно розроблені у системі Matlab алгоритми керування перевести у цифрову форму, отримати різницеві рівняння та привести до виду придатного для програмування, а потім написати відповідний код. На кожному етапі реалізації можливі помилки і в загалі такий підхід потребує багато часу і та знання принципів та особливостей реалізації цифрових алгоритмів. Альтернативою цьому є варіант конвертації отриманих алгоритмів з середовища Simulink системи Matlab у потрібну середу програмування контролерів. Такий підхід дозволяє отримати компактний перевірений код при малих затратах часу.

Для програмної реалізації розроблених алгоритмів будемо використовувати пакет Simulink PLC Coder з його бібліотекою функціональних блоків PLCLib. Для цього з використанням блоків бібліотеки PLCLib проведемо цифрову реалізацію алгоритмів керування у моделі Simulink. Отримана модель з алгоритмами підготовленими до конвертації наведена на рис. 4.8.

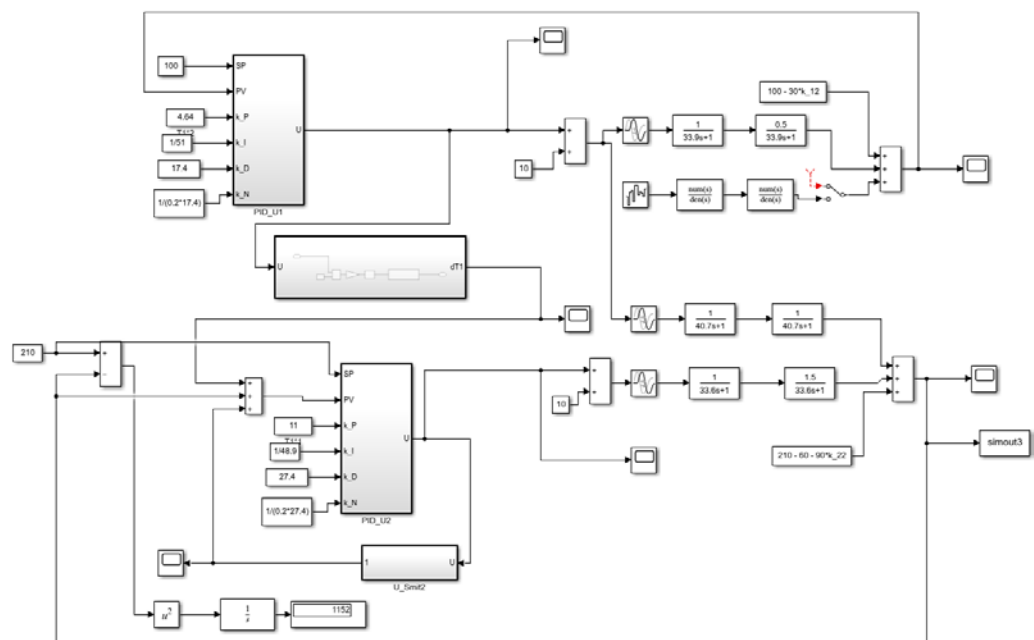


Рис. 4.8 – Схема моделювання САК процесом випічки хліба з цифровими алгоритмами керування, які підготовлені до конвертації

На рис. 4.9 – 4.11 наведені схеми моделювання ПІД регулятора та ланок коригуючих зв'язків.

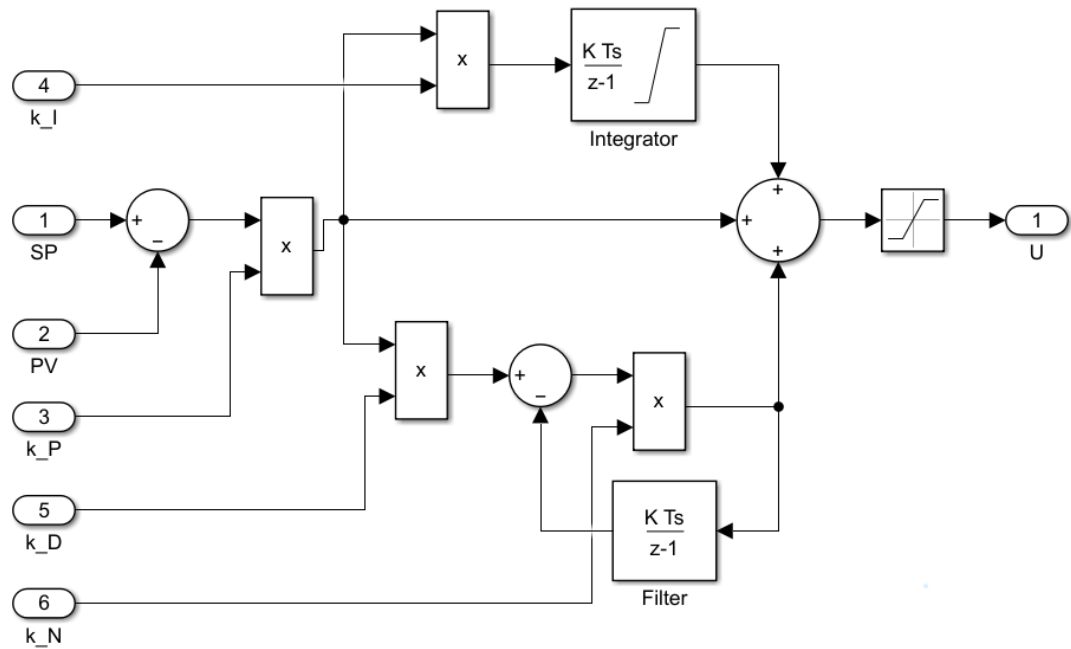


Рис. 4.9 – Схема цифрового ПІД-регулятора

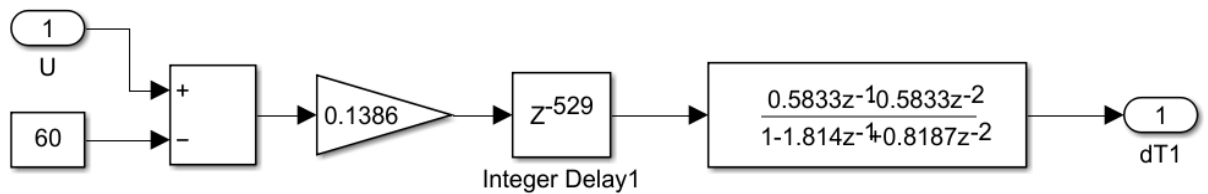


Рис. 4.10 – Схема моделювання цифрового варіанту коригуючого зв'язку (блок «KS»)

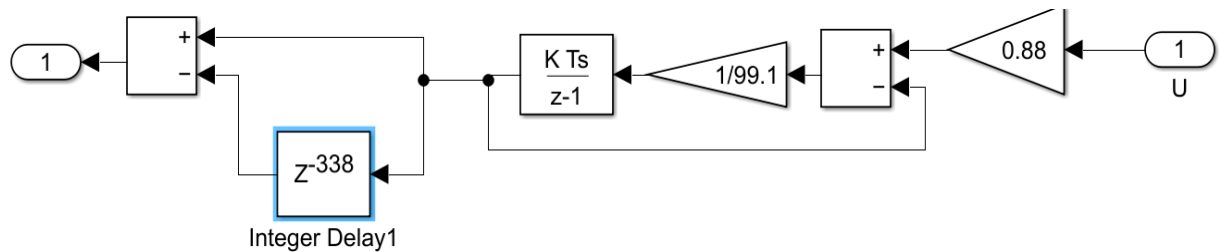


Рис. 4.11 – Схема моделювання цифрового варіанту коригуючого зв'язку (блок «U_Smit»)

Відповідність цифрового варіанту коригуючого зв'язку його неперервному аналогу підтверджена результатами моделювання. На рис. 4.12 – 4.15 наведена відповідна схема моделювання та отримані результати.

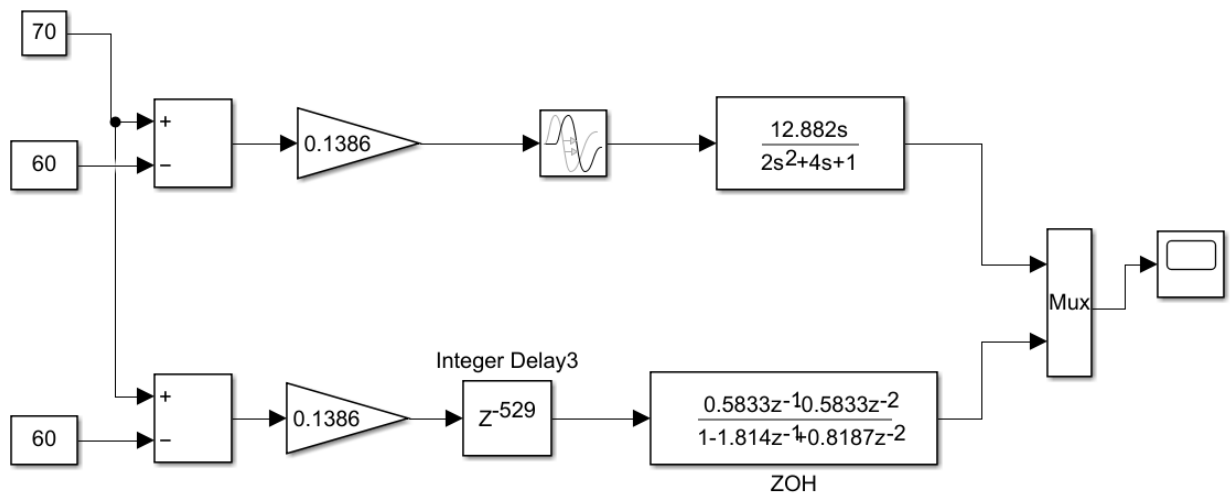


Рис. 4.12 – Схема моделювання цифрового та неперервного варіантів коригуючих зв'язків

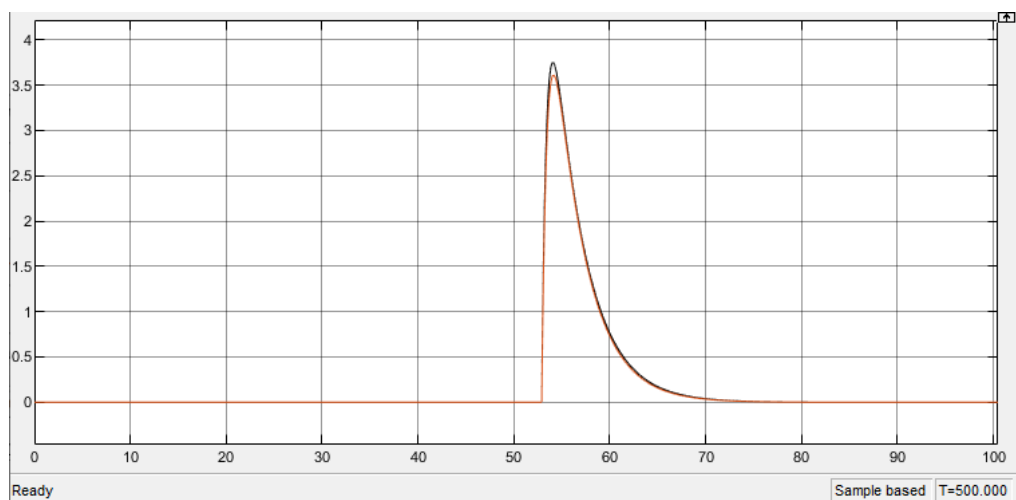


Рис. 5.13 – Результати моделювання цифрового та неперервного варіантів коригуючих зв'язків

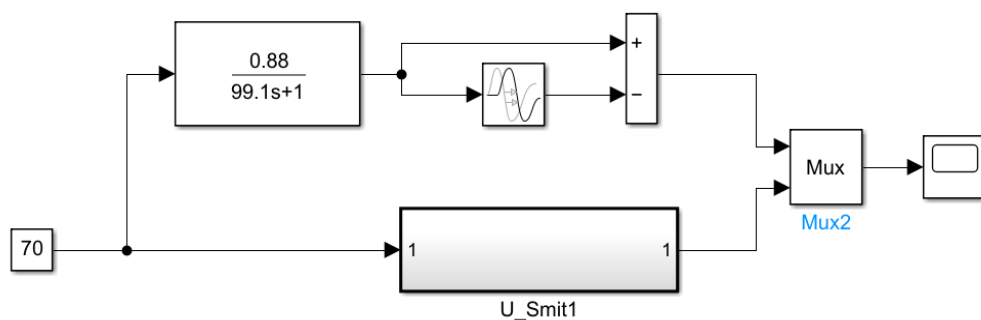


Рис. 5.14 – Схема моделювання цифрового та неперервного варіантів коригуючих зв'язків

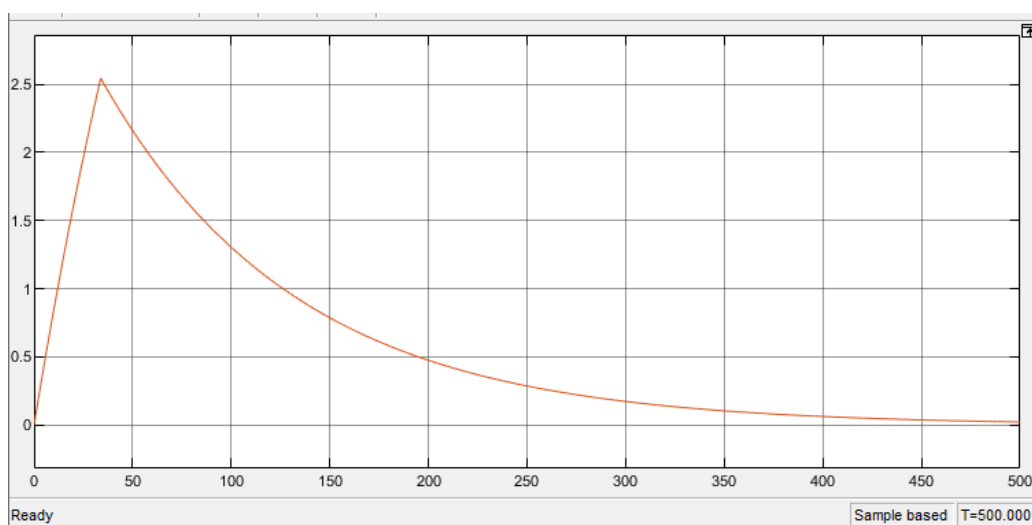


Рис. 5.15 – Результати моделювання цифрового та неперервного варіантів коригуючих зв'язків

Результати моделювання системи керування при використанні цифрових алгоритмів які підготовлені до конвертації наведені на рис. 4.16 та 4.16.1.

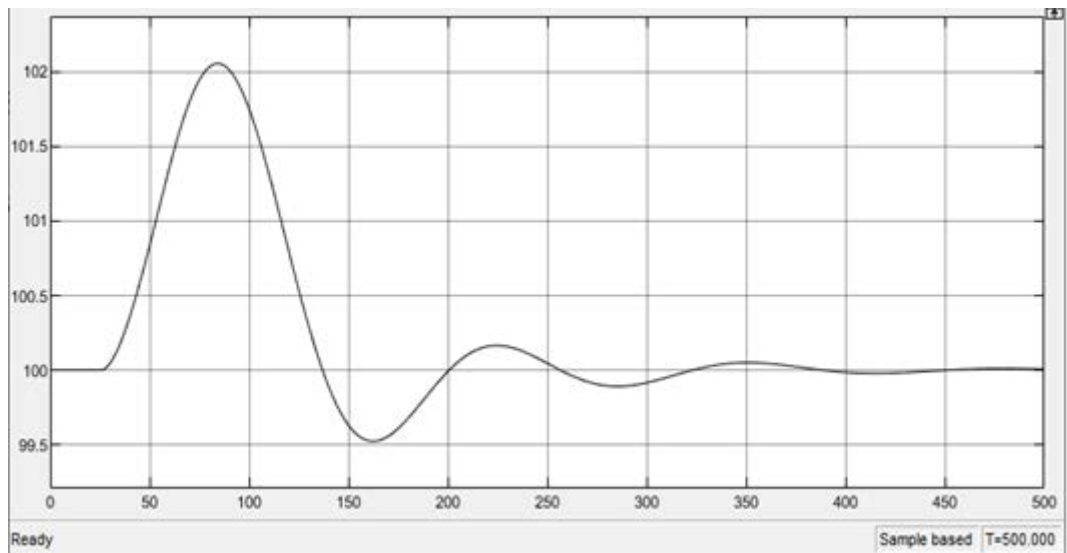


Рис. 4.16 – Динаміка зміни температури у зоні зволоження

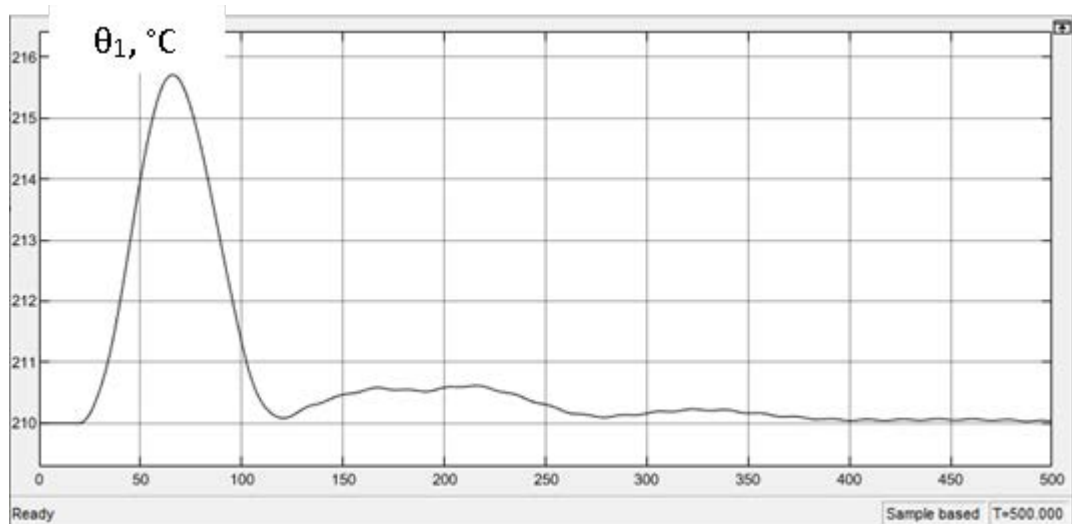


Рис. 4.16.1 – Динаміка зміни температури у першій зоні випічки

Процедура отримання Z -передатної функції на прикладі ланки коригуючого зв'язку наведена на рис. 4.17. Для отримання Z -передатної функції використовуються спеціальні вбудовані функції системи MatLab що призначені для роботи з передатними функціями у неперервному та дискретному часі.

Для перетворення неперервної форми передатної функції у дискретну форму (Z -передаточну функцію) використовуємо метод «Zero-order hold on the inputs».

Рис. 4.17 – Отримання Z-передатної функції ланки коригуючого зв'язку
(блок «KS»)

Для кожної підсистеми яка буде конвертуватися у мову SCL середовища
Step 7 проведемо налаштування рис 4.18.

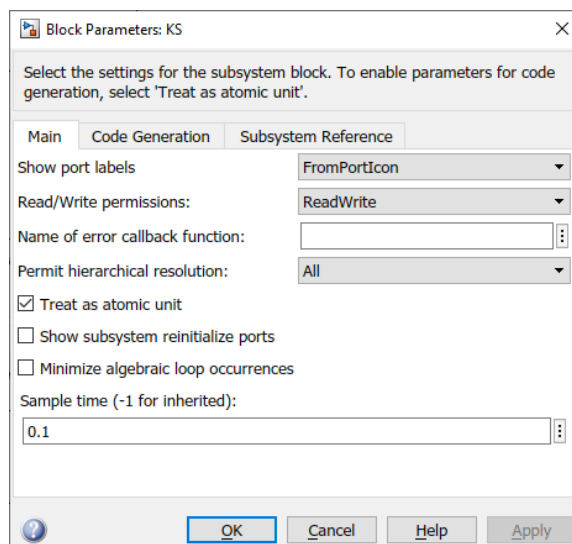


Рис. 4.18 – Вікно налаштування підсистем для їх конвертації

Пакет Simulink PLC Coder налаштуємо для компіляції коду для середовища Siemens SIMATIC Step7 5.4 (рис. 4.19).

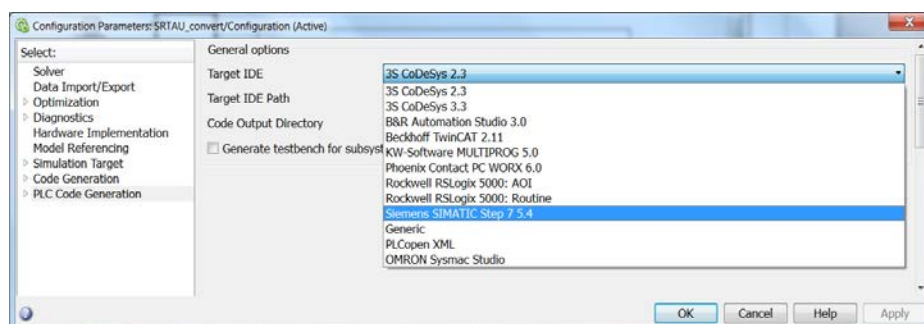


Рис. 5.19 – Вікно налаштування пакету Simulink PLC Coder

Далі послідовно проведемо генерацію програмного коду для блоку ПІД регулятора та блоків коригуючих зв'язків. На рис. 4.20 та 4.21 наведена процедура генерації коду для коригуючого зв'язку.

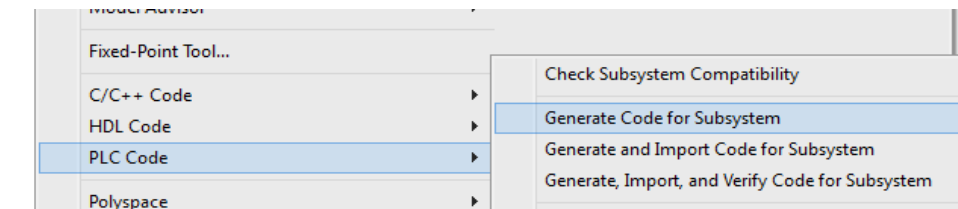


Рис 5.20 – Компіляція коду

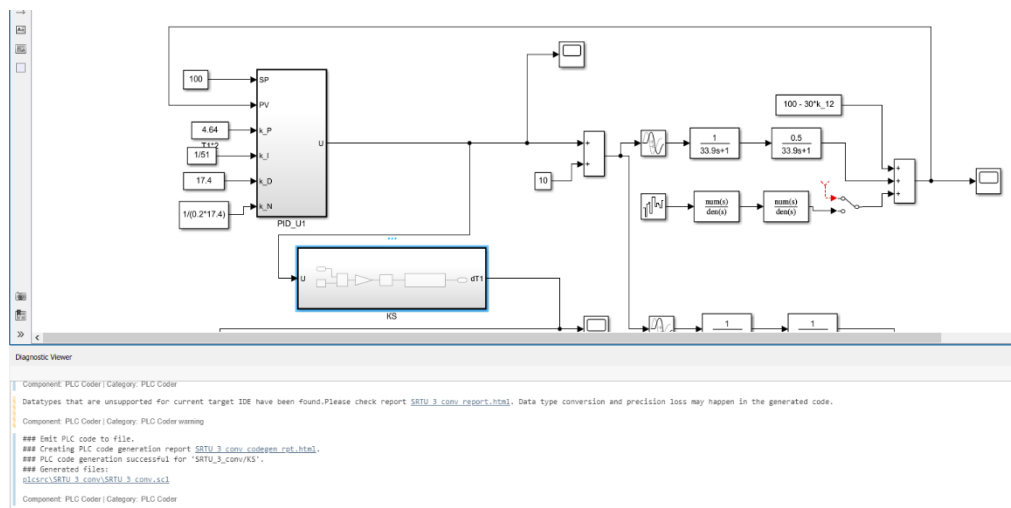


Рис. 4.21 – Результати успішної генерації коду коригуючого зв’язку для середовища SIMATIC Step7 5.4

На рис. 4.22 наведено вихідний генерований код мовою SCL для блоку коригуючого зв’язку «U_Smit». Повний список вихідних кодів конвертованих блоків наведено у додатку А.

```

Editor - D:\M2023\Бондаренко\ПАЗ\ДЕЛ 5\plcsrc\SRTU_3_conv\SRTU_3_conv.scl

EDITOR VIEW
New Open Save Print Compare Go To Find Refactor Code Analyze Profiler Run Section Run and A
FILE NAVIGATE CODE ANALYZE SECTION

11 SRTU_3_conv.scl
12 * Model sample time : 0.1s
13 * Subsystem name : SRTU_3_conv/KS
14 * Subsystem sample time : 0.1s
15 * Simulink PLC Coder version : 3.6 (R2021a) 13-Nov-2021
16 * ST code generated on : Tue Nov 07 21:11:23 2023
17 *
18 * Target IDE selection : Siemens SIMATIC Step 7
19 * Test Bench included : No
20 *
21 *)
22 FUNCTION_BLOCK b_s
23 VAR_INPUT
24 ssMethodType: INT;
25 U: REAL;
26 END_VAR
27 VAR_OUTPUT
28 dt1: REAL;
29 END_VAR
30 VAR
31 IntegerDelay1_DSTATE: ARRAY [0..528] OF REAL;
32 c_DiscreteFilter1_st: ARRAY [0..1] OF REAL;
33 denAccum: REAL;
34 b_i: DINT;
35 END_VAR
36 CASE ssMethodType OF
37 0:
38 (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/KS' *)
39 (* InitializeConditions for DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter1' *)
40 c_DiscreteFilter1_st[0] := 0.0;
41 c_DiscreteFilter1_st[1] := 0.0;
42 (* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/KS' *)
43 (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/KS' *)
44 (* InitializeConditions for Delay: '<S1>/Integer Delay1' *)
45 FOR b_i := 0 TO 528 DO
46 IntegerDelay1_DSTATE[b_i] := 0.0;
47 END_FOR;
48 (* End of InitializeConditions for Delay: '<S1>/Integer Delay1' *)
49 (* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/KS' *)
50 1:
51 (* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/KS' *)
52 (* Output: '<Root>/dt1' incorporates:
53 * DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter1' *)
54 dt1 := (0.5833 * c_DiscreteFilter1_st[0]) + (-0.5833 * c_DiscreteFilter1_st[1]);
55 (* Update for DiscreteFilter: '<S1>/Discrete Filter1' incorporates:

```

Рис. 4.22 – Вихідний генерований код мовою SCL блоку коригуючого зв’язку «U_Smit» для середовища програмування Step7

Після генерації коду в середовищі MATLAB додаємо файли до проекту який створено у середовищі Step 7. Процес інтеграції програмних модулів у проект Step 7 наведено на рис. 4.23, а на рис 4.24 приклад імпортованого генерованого коду.

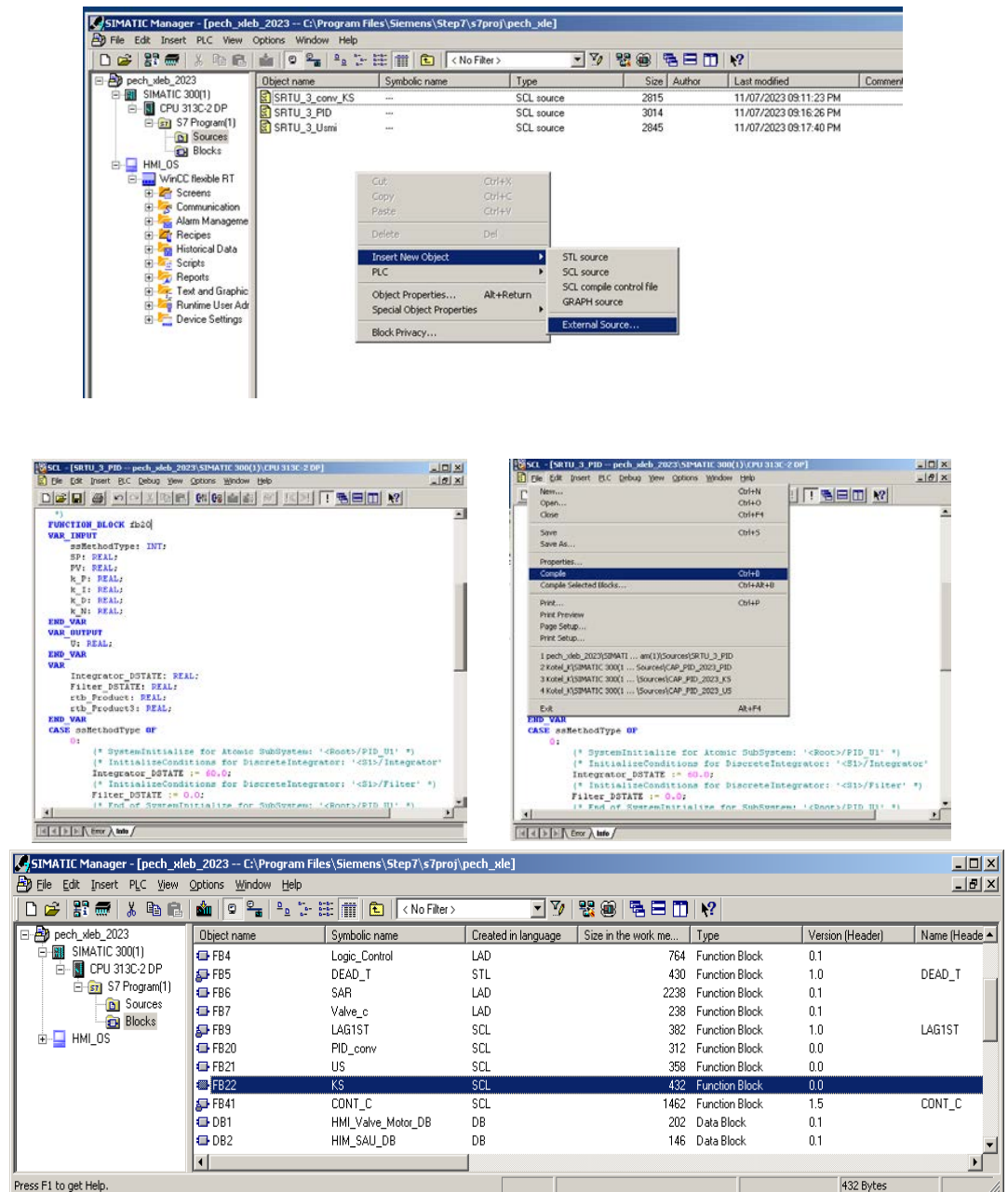


Рис. 4.23 – Процедура імпорту генерованого коду в середовище програмування Step 7 і створення відповідних функціональних блоків

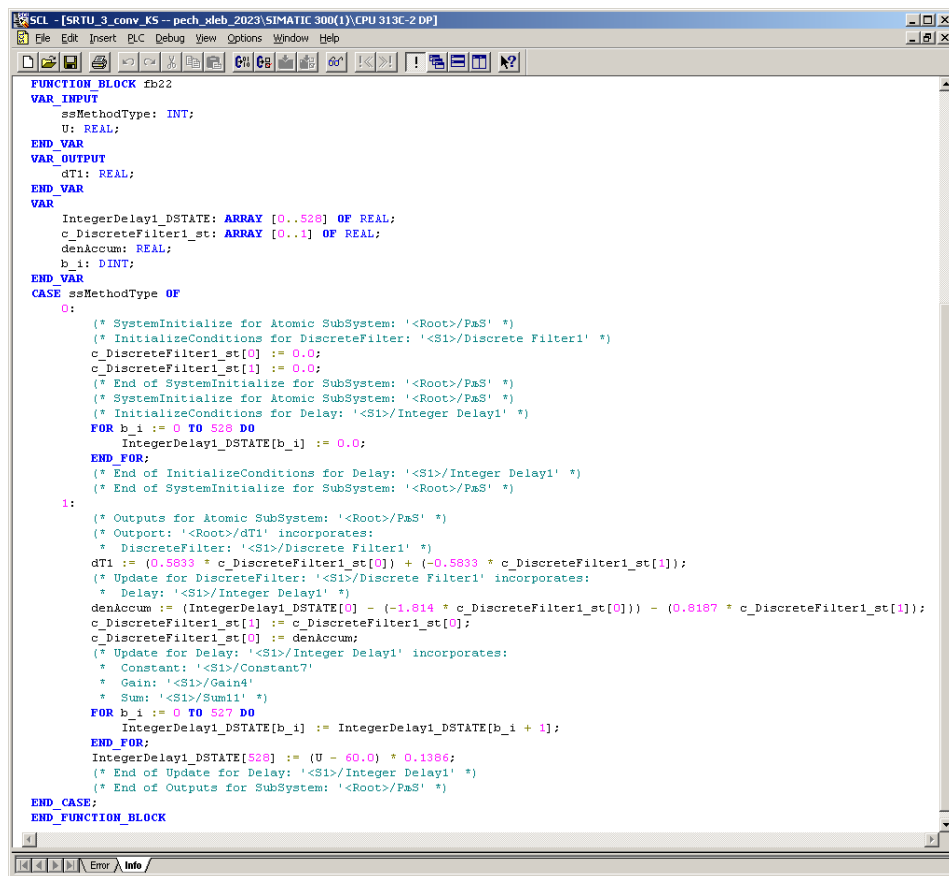


Рис. 4.24 – Приклад імпортованого генерованого коду ПІД-регулятора в середовищі Step 7

Загальний вигляд розробленого проекту в середовищі Step 7 наведено на рис.4.25.

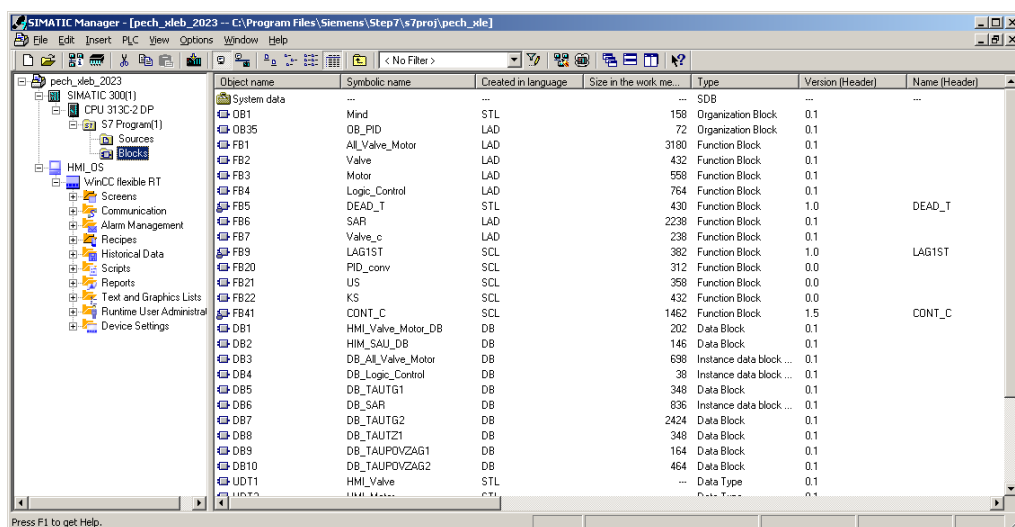


Рис. 4.25 – Загальний вид вікна проекту в середовищі Step 7

Алгоритми регулювання тиску у топці котла та коригуючі алгоритми реалізовані у функціональному блоці FB5. Фрагмент коду програми наведено на рис. 4.26.

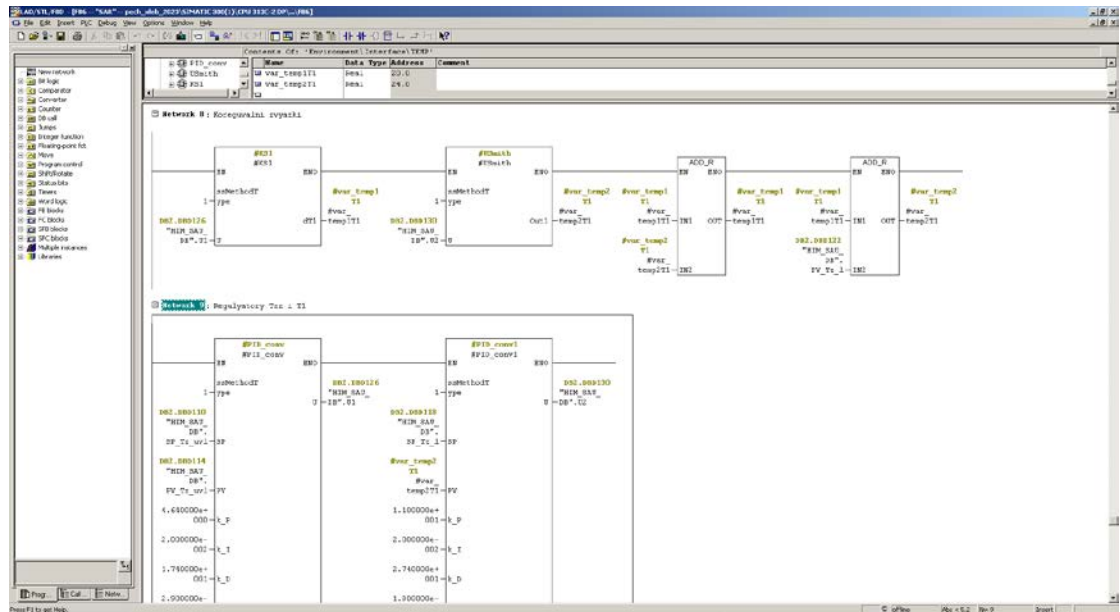


Рис. 4.26 – Фрагмент програми в функціональному блоці FB5 яка реалізує розрахунок регулятора та коригуючі алгоритми

Проведемо тестування програми в режимі емуляції контролеру. Для цього доповнимо програму моделлю об'єкта керування і запусимо розрахунок моделі САР за каналами регулювання температури у зоні зволоження та температури у першій зоні випічки. Фрагмент програми моделі ОК наведено на рис. 4.27. А результати тестування у вигляді перехідної характеристики САР розрядження наведені у вікні SCADA системи WinCCflexible на рис. 4.28 та 4.29.

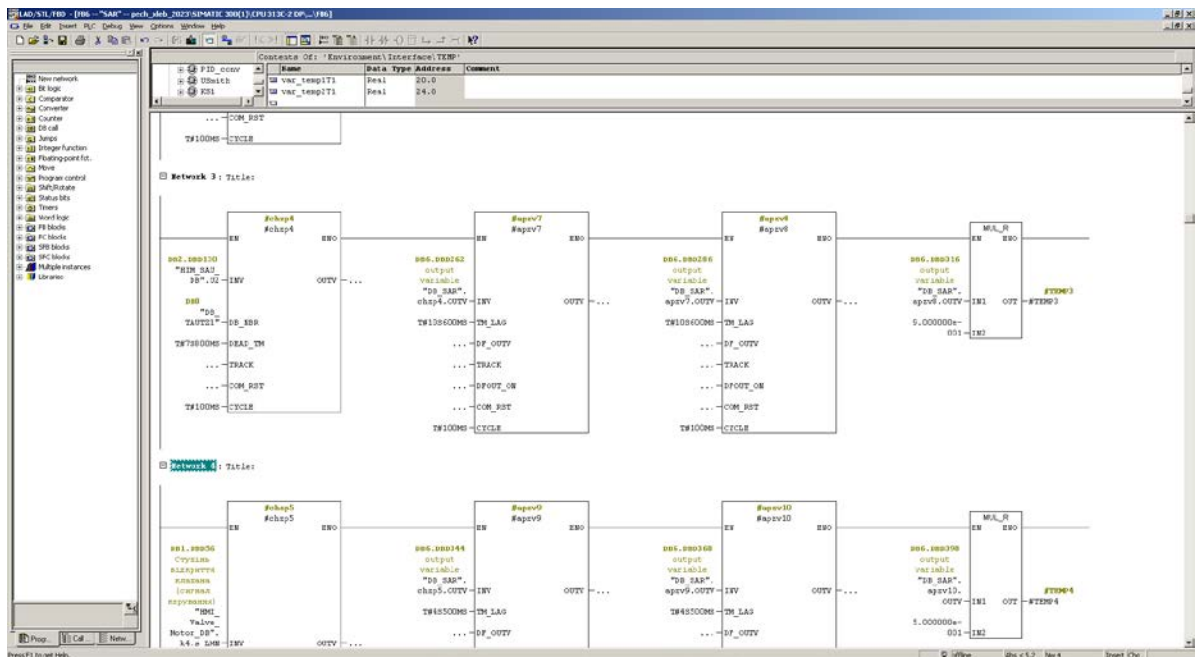


Рис. 4.27 – Фрагмент програми в організаційному блоці OB35 яка реалізує розрахунок моделі ОК

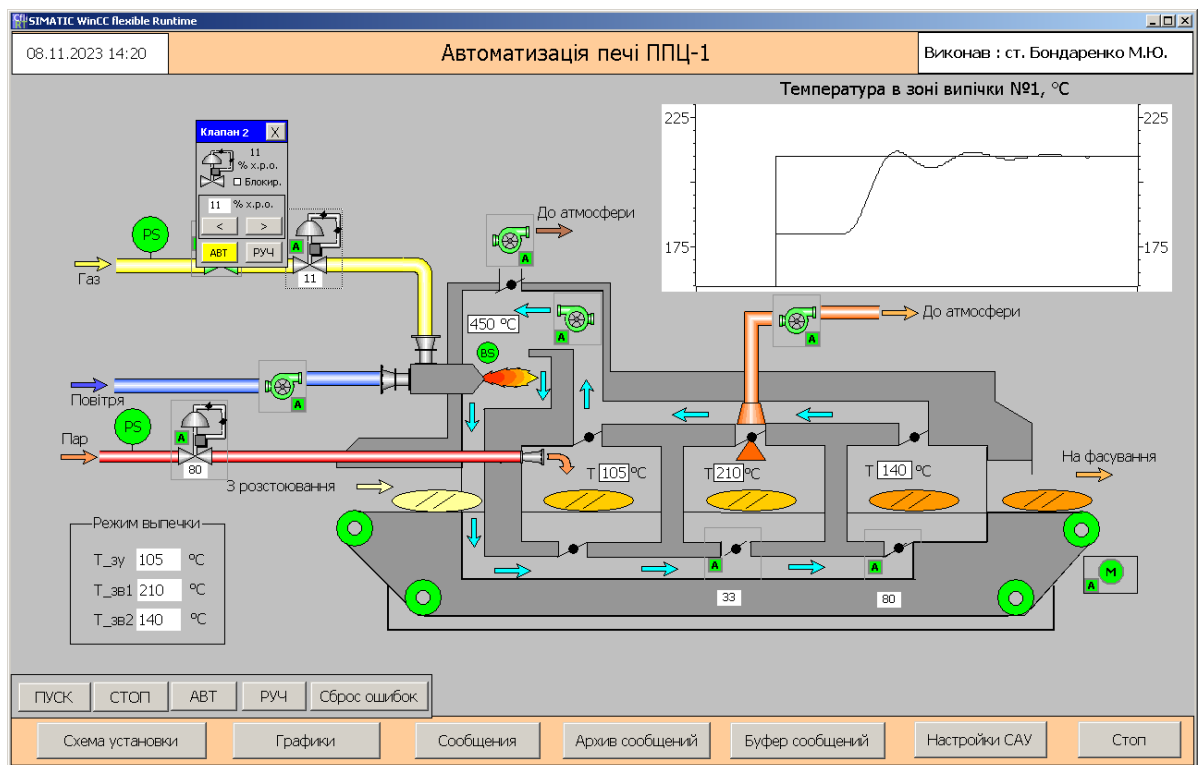


Рис. 4.28 – Результати тестування у вигляді перехідної характеристики моделі CAP температури у першій зоні випічки (головний екран)

Результати тестування підтвердили працездатність отриманих в результаті конвертації програмних модулів і ефективність застосування пакету Simulink PLC Coder.

4.3 Оцінка економічної ефективності впровадження розробок

За результатами моделювання можна зробити висновки що підвищення динамічної точності САР температури у першій зоні випічки на основі компенсації запізнення у власному русі системи та принципу автономності відносно зміни керуючої дії у контурі регулювання температури у зоні зволоження дозволяє забезпечити виконання технологічного регламенту та як наслідок зменшити брак готової продукції з 4% до максимум 2%. До того ж зменшення заданої температури випічки у першій зоні, зі збереженням виконання технологічного регламенту, може додатково дозволити зменшити питомі витрати теплової енергії на випікання.

Зменшення заданого значення температури у першій зоні та наближення її до нижньої границі можливо при відносно незмінних (стаціонарних) властивостях збурень зокрема їх дисперсії.

4.4 Висновки за розділом

В цьому розділі розглянута програмно-технічна структура системи керування процесом випічки хліба. Обґрунтовано обрані контролер, ПЗО та програмне забезпечення фірми Siemens для реалізації системи.

Розроблені в системі Matlab моделі нових алгоритмів керування за допомогою пакету Simulink PLC Coder були конвертовані для інтеграції у середовище програмування контролерів фірми Siemens Simatic Step 7. Проведене тестування конвертованого програмного забезпечення підтвердило його працездатність та ефективність застосування конвертору пакета Simulink PLC Coder.

Запропонований варіант побудови АСУ ТП на базі МПК серії Simatic S7-313-C 2DP є інвестиційно привабливими, так як розширення функцій системи керування не потребує зміни технічної структури системи і дозволяє залишити базовий контролер без змін. Тому модернізація АСУ на базі Siemens окупається досить швидко.

ВИСНОВКИ

Детально проаналізувавши вибраний об'єкт регулювання, можна зробити висновок, що за каналом регулювання «U2- θ_1 » він має значне співвідношення τ_o/T_o . Велике співвідношення τ_o/T_o знижує динамічну точність та запас стійкості САР.

Запізнення являється головною перешкодою підвищення динамічної точності системи і забезпечення її стійкості особливо для істотно нестационарних об'єктів (k , T , τ – істотно змінюються). Для підвищення динамічної точності системи і забезпечення її стійкості розглядається шлях компенсації дії запізнення на динаміку власного руху системи. З цією ціллю в САР температури у першій зоні випічки θ_1 додається додатковий коригуючий зв'язок.

Було досліджено, що використання нейрорегулятора доречно, коли об'єкт є суттєво нелінійним і нестационарним, саме за цієї умови якість регулювання є вищою, ніж при типових САК.

Використання нечіткої логіки в системах керування дозволяє зменшити втручання оператора в процес керування і, отже, дозволяє розробити нові методики керування більш адаптовані до промислового середовища.

Була розроблена технічна структура мікропроцесорного ядра системи керування та програмне забезпечення системи автоматичного керування ТП випічки хліба.

Були вивчені основні характеристики контролерів фірми Siemens сімейства S7-300. Отримано практичний досвід програмного конфігурування контролерів в середовищах Step7.

Також було проаналізовано техніко-економічну ефективність від впровадження нової системи автоматичного регулювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Хобін В.А. – Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» – Одеса: ДАПТ, 2000. – 16 с.
2. Хобін В.А. – Конспект курсу лекцій з Ідентифікації та моделювання технологічних об'єктів – Одеса 1999. – 78 с.
3. Хобін В.А. – Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Теорія автоматичного управління» – Одеса: ОНАПТ, 2000. – 16с.
4. Хобін В.А. – Конспект курсу лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування. Частина 1. – Одеса 2013. – 110 с.
5. Хобін В.А. – Конспект курсу лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування. Частина 2. – Одеса 2012. – 59 с.6. Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. Системи штучного інтелекту [Текст] / Нікольський Ю.В., Пасічник В.В., Щербина Ю.М. – Львів: «Магнолія» – 2010. – 279с.
7. Литвин В.В. Інтелектуальні системи [Текст] / Литвин В.В., Пасічник В.В., Яцишин Ю.В. – Львів: «Новий Світ» - 2008. - 406с.
8. Руденко О.Г. Штучні нейронні мережі [Текст] / Руденко О.Г., Бодянський Є.В. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 404с.
9. Усков А.А. Інтелектуальні технології управління (для фахівців у галузі теорії управління, аспірантів та студентів старших курсів технічних університетів) [Текст] / О.О. Усков, А.В. Кузьмін. - М.: Гаряча лінія. Телеком, 2004. - 144 с.
10. Круглов В.В. Нечітка логіка та штучні нейронні мережі [Текст] / Круглов В.В., Длі М.І., Голунов Р.Ю. - М.: Фізматліт, 2001. - 302 с.
11. Архангельський В.І. і др. Нейронні мережі в системах автоматизації [Текст] – К. : техніка, 1999. – 364с.
12. Василець Т. Ю. и др. Синтез нейромережевого регулятора для електромеханічної системи з пружними зв'язками в кінематичних передачах //Системи обробки інформації. – 2018. – №. 2. – С. 7-17.

13. Сергій А. Терехов Лабораторія Штучних Нейронних Мереж НТО-2, ВНДІТФ, Сніжинськ / [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <https://b-ok.org/book/530233/94a2fe>, <https://www.twirpx.com/file/600450/>, <https://studfiles.net/preview/986654/>
14. User's Manual .WinCC flexible 2008 Compact / Standard / Advanced.
15. «MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Інструменти штучного інтелекту та біоінформатики». - Дияконів В.П., Круглов В.В М.: СОЛОН-ПРЕС, 2006. - 456 с.
16. Каталог ІК РІ «Промисловий зв'язок для систем автоматизації та приводів». – Siemens AG, 2005. – 666с.
17. Каталог ST70 «SIMATIC – Компоненти для комплексної автоматизації». – Siemens AG, 2007. – 862с.
18. «Автоматизація за допомогою програм Step 7 LAD и FBD». – Ганс Бергер, 2001. – 605с.
19. «Економіка підприємства: Підручник» / За заг. редакторка С.Ф. Покропивного-Вид. 2-ге, перероб. але доп. – К.: Київ, 2000. – 528 с.