

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 камерою варки
та
гарячого копчення ковбас з використанням термоелектричного теплового
насосу»

Здобувача (ки) Петренка Д. С.

(прізвище, ініціали)

2 курсу Ам-20 групи

Керівник доцент, Мазур О.В.

(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)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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-наукова програма	<u>Комп'ютерні системи та програмна інженерія в</u> <u>автоматизації</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри АТПіРС
В.А. Хобін

«22» грудня 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Петренко Дмитро Сергійович

1. Тема роботи «Підвищення ефективності автоматичного керування камерою варки та гарячого копчення ковбас з використанням термоелектричного теплового насосу»

Затверджена наказом ОНТУ №877-03 від 29.11.22 р.

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи «11» червня 2024 р.

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 каталітичної очистки інертних газів, та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування.

Розділ 2. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП каталітичної очистки інертних газів.

Розділ 3. Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж.

Розділ 4. Розробка та дослідження САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію.

Розділ 5. Реалізація та підготовка до впровадження на підприємстві (**підприємство**)

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 «30» листопада 2023 р.

Керівник Мазур О.В.
Завдання прийняв до виконання Петренко Д.С.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ та загальна характеристика роботи	29.12.23 р.	
2	Технологічний процес та задачі підвищення його ефективності засобами автоматичного керування	30.01.24 р.	
3	Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП	28.02.24 р.	
4	Удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж	29.03.24 р.	
5	Розробка та дослідження САК, що реалізує нову, інтелектуально просунуту, функцію	30.04.24 р.	
6	Реалізація та підготовка до впровадження результатів роботи	31.05.24 р.	
7	Оформлення додатків та роботи в цілому	03.06.24 р.	
8	Здача роботи на перевірку керівникові, виправлення зауважень, підпис керівника	06.06.24 р.	
9	Брошування роботи, представлення її завідувачу кафедри, підпис, направлення роботи на зовнішнє рецензування та захист у ЕК	11.06.24 р.	

Здобувач-дипломник Петренко Д.С. Керівник роботи Мазур О.В. \

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 Петренко Д.С. _____
ПІБ Підпис

Анотація

Кваліфікаційна робота Петренка Д.С. присвячена розробці аналітичної математичної моделі та системи керування технологічним процесом варки та гарячого копчення ковбас з використанням термоелектричного теплового насосу. Використання термоелектричного теплового насосу дозволяє суттєво зменшити енергетичні витрати і знизити собівартість готової продукції.

Розроблено та реалізовано комплекс аналітичних математичних моделей процесу гарячого копчення ковбас в універсальній термокамері з використанням термоелектричного теплового насосу, як об'єкту керування. Сформульовано задачі керування, вимоги до їх розв'язку і вибір основних принципів побудови автоматичних систем. Проведено синтез і аналіз системи автоматичного регулювання базової структури. За рахунок впровадження міжрегуляторного коригуючого зв'язку удосконалено алгоритм, що реалізує функції регулювання САК ТП гарячого копчення ковбас. Також розглянуто варіант алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК ТП, на основі застосування штучних нейронних мереж. Розроблено САК процесом каталітичної очистки інертних газів, що реалізує функцію максимізації енергоефективності при гарантуванні дотримання обмежень по температурі. Розроблено та налагоджено прикладне програмне забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування (СГК) процесом гарячого копчення ковбас, а також людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога. Після оцінки економічної ефективності підтверджено доцільність впровадження розробок. Були проведені усі необхідні порівняння різних регуляторів, зроблено відповідні висновки по кожному із варіантів керування. Весь матеріал викладений в зручному представлені і проілюстрований.

Кількість сторінок: __, кількість рисунків __, кількість таблиць __.

Ключові слова: система керування, математична модель, перехідний процес, підвищення ефективності.

ЗМІСТ

Вступ.....	13
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ВАРКИ ТА ГАРЯЧОГО КОПЧЕННЯ КОВБАС З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСУ, ТА ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	15
1.1.1 Загальний аналіз технологічного процесу, реалізованого агрегатом, цілей і умов його ведення.	15
1.1.1.1 Складання схеми та опис суті технологічного процесу, реалізованого технологічним агрегатом, як цілеспрямованого перетворення матеріальних і енергетичних потоків.	15
1.1.1.2 Опис конструкції технологічного агрегату та особливостей його експлуатації.....	16
1.1.1.3 Формулювання умов, при яких можливо й доцільно реалізувати розглянутий технологічний процес.....	17
1.1.1.4 Параметризація схеми технологічного процесу й загальна (на якісному рівні) характеристика параметрів і їх взаємозалежностей.....	18
1.1.2 Конкретизація регламентів і умов ведення процесу, його формалізоване подання.	20
1.1.2.1 Виявлення нормативів ведення технологічного процесу і роботи технологічного агрегату.	20
1.1.2.2 Аналіз наслідків виходу технологічних і експлуатаційних параметрів за регламентні допуски.	21
1.1.2.3 Виявлення параметрів, що характеризують умови ведення технологічного процесу та експлуатації технологічного агрегату.	21
1.1.2.4 Формалізація параметризованої схеми технологічного процесу і одержання його параметричної схеми.	22
1.1.3 Розробка структурної (координатної) схеми об'єкта керування	23
1.1.3.1 Конкретизація мети і завдань керування об'єктом, виявлення регульованих координат.	23
1.1.3.2 Вибір керуючих дій об'єкту керування.	24

1.1.3.3 Виділення та класифікація збурень об'єкта керування.	24
1.1.3.4 Складання структурної (координатної) схеми об'єкту регулювання.	24
1.2 Розробка та реалізація комплексу моделей процесу каталітичної очистки газових сумішей як об'єкту керування	25
1.2.1 Розробка та реалізація математичної моделі процесу варки та гарячого копчення ковбас з використанням термоелектричного теплового насосу як об'єкту керування.....	25
1.2.1.1 Розробка структурної схеми математичної моделі процесу варки та гарячого копчення ковбас з використанням термоелектричного теплового насосу як об'єкту керування.	25
1.2.1.2 Фізичні залежності використані при розробці математичної моделі процесу каталітичної очистки газових сумішей як об'єкту керування.....	27
1.2.1.3. Розробка математичної моделі батону ковбаси. Для описування моделі водяної сорочки скористуємося наступними залежностями:.....	29
1.2.1.4 Розробка математичної моделі термокамери.	32
1.2.1.5 Розробка математичної моделі теплообмінника нагрівача повітря та нормалізатора вологи.....	34
1.2.2 Отримання перехідних та квазістатичних характеристик моделі та обґрунтування її адекватності.....	37
1.2.2.1 Отримання квазістатичних характеристик моделі та обґрунтування її адекватності.	37
1.2.2.2 Отримання перехідних характеристик та параметрична ідентифікація моделей першого порядку основних каналів перетворення.....	39
1.3 Формулювання задач керування, вимог до їх розв'язку і вибір основних принципів побудови автоматичних систем	42
1.3.1 Формулювання задач керування технологічним агрегатом.	42
1.3.1.1 Декомпозиція загальної задачі керування технологічним агрегатом і формулювання окремих задач.	42
1.3.1.2 Обґрунтування необхідності та автоматизації кожної із окремих задач керування.....	42

1.3.2 Формалізація вимог до розв'язання задачі регулювання та вибір принципу побудови системи автоматичного регулювання.	43
1.3.2.1 Формалізація вимог до гранично-припустимих статичних і динамічних відхилень регульованих змінних від відповідних заданих значень перехідних і динамічно сталих процесів і подання їх у формі регламентних зон регульованих змінних.	43
1.3.2.2 Формалізація інтегральних вимог до перехідних та динамічно сталих процесів регулювання у формі інтегральних критеріїв оптимальності САР.	44
1.4 Синтез і аналіз системи автоматичного регулювання базової структури.....	45
1.4.1 Конкретизація структури САР і алгоритмів регулювання.	45
1.4.1.1 Розробка на основі обраного загального принципу побудови САР, її базової конкретної структури.	45
1.4.1.2 Вибір альтернативних варіантів типових алгоритмів регулювання, запис їх рівнянь і передатних функцій.	46
1.4.2 Параметричний синтез САР з різними варіантами типових алгоритмів регулювання і їх порівняльний аналіз для детермінованих вхідних дій.....	46
1.4.2.1 Вибір початкових наближень наявних параметрів алгоритмів регулювання на основі інженерних методик параметричного (неоптимального) синтезу САР.	46
1.5 Висновки за розділом.....	51
РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ І АНАЛІЗ САР ПІДВИЩЕНОЇ ДИНАМІЧНОЇ ТОЧНОСТІ	53
2.1 Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності.	53
2.1.1 Аналіз особливостей об'єкта регулювання, що знижують динамічну точність і вибір способів її підвищення за рахунок введення в структуру САР додаткових зв'язків.	53
2.1.2 Розробка на основі вибраних способів підвищення динамічної точності САР її структурної схеми і формулювання (в аналітичній формі) умов, що забезпечують необхідні властивості САР.....	53
2.1.3 Виведення передатної функції коригуючого зв'язку, аналіз його структури з умов фізичної реалізованості, приведення до фізично реалізуємого виду,	

представлення у формі з'єднання типових динамічних ланок та отримання перехідних характеристик.	54
2.2 Спрощення коригуючих зв'язків з урахуванням особливостей їх технічної реалізації і параметричний синтез САР при детермінованих вхідних діях.	58
2.2.1 Аналіз складності технічної реалізації коригувальних зв'язків проводиться з урахуванням доцільності такої реалізації та можливостей технічних засобів. За результатами такого аналізу роблять висновок про спрощення ПФКЗ за рахунок зниження їх розмірності, апроксимації запізнення дрібно-раціональними передаточними функціями і т.п. зі збереженням загальних властивостей зв'язків.	58
2.2.2 Вибір початкових наближень параметрів спрощених коригуючих зв'язків, який здійснюється з умов близькості перехідних характеристик коригуючих зв'язків до і після їх спрощення, де можливо застосувати будь-який метод як оптимізаційного, так і звичайного.	59
2.2.3 Розробка структурної схеми цифрового імітаційного моделювання і параметричний оптимальний синтез САР підвищеної динамічної точності для детермінованих (ступінчастих) вхідних дій.	60
2.3 Висновки за розділом.	62
Основним шляхом підвищення динамічної точності в даному випадку обрано побудову автономної САР.	62
РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП, НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.	64
3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем управління, побудованих на базі апарата нечіткої логіки для розглянутого об'єкта керування.	64
3.2. Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування що характеризується нелінійними статичними характеристиками.	65
3.3. Параметричний синтез САУ з традиційним (П, ПІ, ПІД) регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.	68

3.4. Розробка моделі САУ з нечітким регулятором (НР) для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання	70
3.4.1. Розробка моделі САУ з нечітким регулятором (НР) за алгоритмом Сугену 0-го порядку для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.....	70
3.4.2. Розробка моделі САУ з нечітким регулятором (НР) за алгоритмом Мамдані для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.....	78
3.5. Порівняльний аналіз функціонування САУ з традиційним ПД регулятором і САУ з нечітким регулятором.	85
3.6. Обґрунтування актуальності застосування нейромережових алгоритмів управління.	88
3.7. Розробка моделі САК з нейрорегулятором.	89
3.8. Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором.	108
3.9. Аналіз функціонування різних САУ за якістю регулювання за умов впливів, що збурюють, випадкового характеру.	113
3.10. Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера.	118
3.11. Висновки за розділом.....	125
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА САК ПРОЦЕСОМ ГАРЯЧОГО КОПЧЕННЯ КОВБАС, ЩО РЕАЛІЗУЄ ФУНКЦІЮ МАКСИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРИ ГАРАНТУВАННІ ДОТРИМАННЯ ОБМЕЖЕНЬ ПО ТЕМПЕРАТУРІ	127
4.1. Обґрунтування актуальності додаткової функції гарантування дотримання обмежень температури на виході з реактора САК процесом гарячого копчення ковбас для підвищення продуктивності.....	127
4.2. Вибір і опис принципу реалізації функції гарантування дотримання обмежень температури $T_{гнв}$	128
4.3. Розробка структурної схеми САК гарантування дотримання обмежень температури $T_{гнв}$	132

4.4. Розробка схеми імітаційного моделювання САК і плану комп'ютерних експериментів по дослідженню її ефективності, представлення та аналіз результатів моделювання.	133
РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ НА ПІДПРИЄМСТВІ «КРІОНІНГ ІНЖІНІРИНГ» РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.....	138
5.1. Розробка програмно-технічної структури	138
5.1.1. Технічна структура.....	138
5.1.2. Реалізація ПЛК на базі BeagleBone Black.....	139
5.2. Розробка та налагодження прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування (СГК) гарячого копчення ковбас.....	140
5.2.1. Переслідувані цілі та основні положення.....	140
5.2.2. Реалізація «цифрової» моделі СГК процесом каталітичної очистки інертних газів в середовищі Simulink, з використанням бібліотеки PLCLib пакета Simulink PLC Coder.	141
5.3. Розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом гарячого копчення ковбас та людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога.....	148
5.3.1 Розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом гарячого копчення ковбас.....	148
5.3.2 Розробка програмного забезпечення людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога	151
5.3.3 Тестування розробленого програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів та людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога.	153
5.4. Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.	155
5.5 Висновки за розділом.....	162
ВИСНОВОК.....	164
ЛІТЕРАТУРА.....	168
ДОДАТОК А.....	171
ДОДАТОК Б.....	9

ДОДАТОК В	17
ДОДАТОК Г	28
ДОДАТОК Ґ	32
ДОДАТОК Д	43
ДОДАТОК Д	51

Перелік умовних позначень

ПП – перехідний процес;

АК - алгоритм керування;

ОР - об'єкт регулювання;

ОК - об'єкт керування;

САК - система автоматичного керування;

ТП - технологічний процес;

ПДТ – підвищена динамічна точність;

СГК – Система гарантуючого керування.

Вступ

М'ясна галузь – це одна з найважливіших та найбільших галузей у структурі харчової промисловості та для забезпечення продовольчої безпеки України. Включення в раціон харчування людини високоякісної та доступної продукції тваринного походження, зокрема м'яса худоби та птиці, на сьогодні є пріоритетним завданням державної політики країни.

Основне завдання м'ясної галузі – комплексна переробка худоби та птиці. Одним з провідних в цій галузі є сегмент виробництва ковбасних виробів. Його частка в Україні складає 14,5% від загального обсягу всієї продукції м'ясопереробної галузі і 30% від загального обсягу готової м'ясної продукції. Ковбасна продукція знаходиться на четвертому місці в шкалі продуктів, що користуються постійним попитом у населення, поступаючись молочним продуктам, фруктам та овочам і хлібобулочним виробам.

Ковбасні вироби є важливою складовою харчування українців, навіть більше, – ковбаса традиційно використовується в українській кулінарії. Окрім цього, дана група товарів входить до переліку мінімального «споживчого кошика». Скорочення купівельної спроможності населення останнім часом спонукає до споживання ковбасних виробів як замінильника більш дорогого м'яса.

Рівень споживання ковбасних виробів є свого роду індикатором добробуту нації. Український ринок м'ясних та ковбасних виробів відрізняється низкою особливостей. Ринок майже досяг свого насичення, жорстка конкуренція визначає асортимент, якість та регулює цінову політику. Певний надлишок ковбасних виробів у магазинах великих торгових роздрібних мереж примушує виробників випускати «орендовані» продукти високої якості, шукати нові ніші та створювати інноваційну продукцію. Специфікою ринку м'ясних виробів є його залежність від сировини та якості її обробки.

При виробництві м'ясних та ковбасних виробів одним з основних технологічних процесів є термічна обробка продукту, яка включає варку та гаряче копчення. Термічна обробка ковбасних виробів проводиться в спеціальних термічних камерах або шафах, які можуть бути призначені для окремого технологічного процесу, або бути універсальними поєднуючи термічну

обробку всіх необхідних видів.

Технологічний процес приготування ковбасних виробів в універсальній термокамері умовно можна поділити на два етапи: копчення та варка. Для обох випадків задля забезпечення отримання продукту високої якості, важливим є дотримання заданих температурних режимів та вологості теплоносія. В якості теплоносія може виступати повітря, пара, пароповітряні суміші, вода та ін.

Для приготування пароповітряної суміші заданої температури та вологості доцільно повітря спочатку переохолоджувати. Тоді зайва волога конденсується і тим самим відносна вологість доводиться до 100%. Переохолодивши повітря і потім догрівши його до необхідної температури отримаємо пароповітряну суміш з визначеною температурою та відносною вологістю. Температура переохолодження та температура догрівання складають основу технологічного регламенту.

Розроблений технологічний регламент служить основою: а) розробки термокамери, в якій буде реалізовано технологічний процес; б) розробки системи автоматичного керування технологічним процесом при його реалізації у виробничих умовах.

Точне дотримання технологічного регламенту можливе лише за умови високоефективного управління технологічним процесом, що забезпечується використанням автоматичних систем управління. Тому актуальним є автоматизація процесу варки та гарячого копчення ковбас в універсальній термокамері.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ВАРКИ ТА ГАРЯЧОГО КОПЧЕННЯ КОВБАС З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСУ, ТА ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБАМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1.1 Загальний аналіз технологічного процесу, реалізованого агрегатом, цілей і умов його ведення.

1.1.1.1 Складання схеми та опис суті технологічного процесу, реалізованого технологічним агрегатом, як цілеспрямованого перетворення матеріальних і енергетичних потоків.

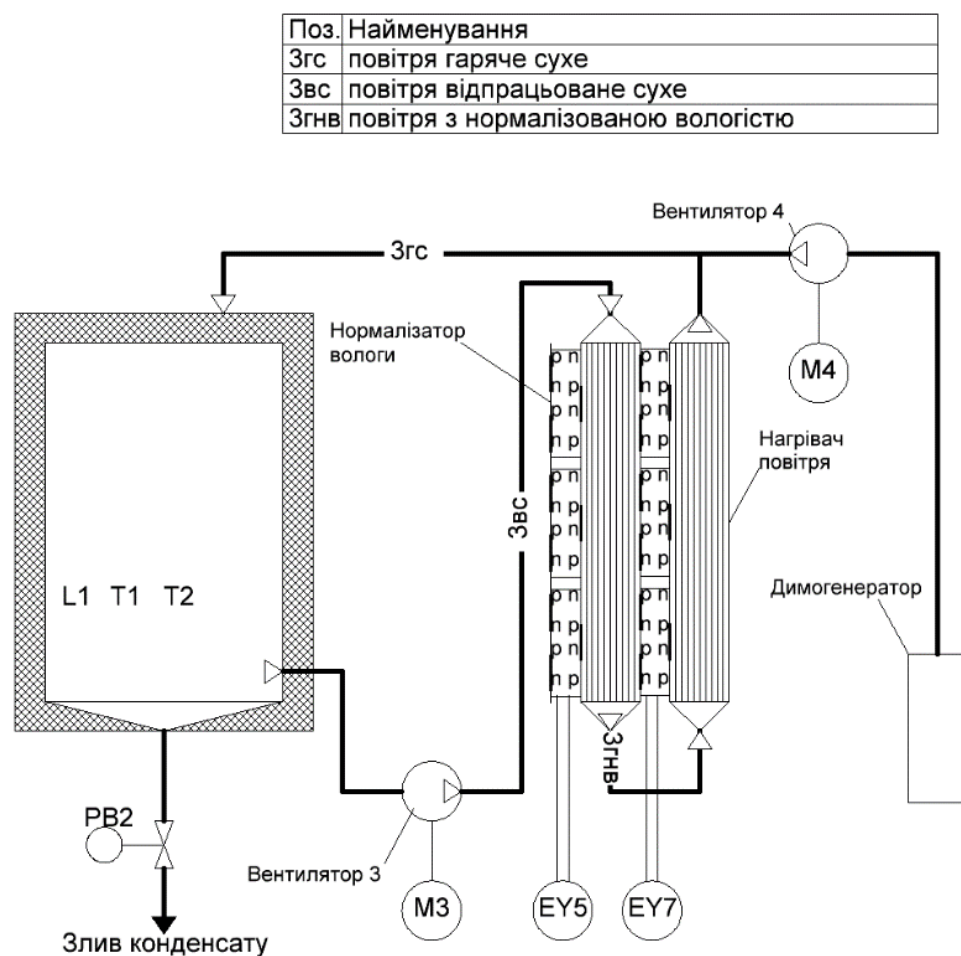


Рис. 1.1 – технологічна схема процесу термічної обробки ковбаси в універсальній термокамері

Термічна обробка заключається в двох головних етапах: обжарюванні та варці. Обжарювання ковбаси в універсальній термокамері полягає в термічній обробці ковбасних напівфабрикатів (батони ковбаси) теплоносієм (повітря) з фіксованою температурою $T=95^{\circ}\text{C}$ та відносною вологістю $W=5\%$ до досягнення

температури в центрі ковбасного батону 45°C , варення ковбаси в універсальній термокамері полягає в термічній обробці ковбасних напівфабрикатів (батони ковбаси) теплоносієм(повітря) з фіксованою температурою $T=84^{\circ}\text{C}$ та відносною вологістю $W=100\%$ до досягнення температури в центрі ковбасного батону 75°C . Розглянутий агрегат є камерою періодичної дії, після досягнення температури в центрі батону 75°C термічну обробку вважати завершеною.

1.1.1.2 Опис конструкції технологічного агрегату та особливостей його експлуатації.

В основі роботи елементів Пельтьє лежить контакт двох струмопровідних матеріалів з різними рівнями енергії електронів у зоні провідності. При протіканні струму через контакт таких матеріалів, електрон повинен отримати енергію, щоб перейти у більш високоенергетичну зону провідності іншого напівпровідника. При поглинанні цієї енергії відбувається охолодження місця контакту напівпровідників. При протіканні струму в зворотному напрямку відбувається нагрівання місця контакту напівпровідників, додатково до звичайного тепловому ефекту.

При контакті металів ефект Пельтьє настільки малий, що непомітний на тлі омичного нагріву і явищ теплопровідності. Тому при практичному застосуванні використовуються контакт двох напівпровідників.



Рис. 1.2 – Термоелемент пельтьє

Елемент Пельтьє складається з однієї або більше пар невеликих напівпровідникових паралелепіпедів — одного N-типу і одного Р-типу в парі

(зазвичай телуриду вісмуту, Bi_2Te_3 та германіду кремнію), які попарно з'єднані за допомогою металевих перемичок. Металеві перемички одночасно служать термічними контактами і ізолювані непровідною плівкою або керамічною пластинкою. Пари паралелепіпедів з'єднуються таким чином, що утворюється послідовне з'єднання багатьох пар напівпровідників з різним типом провідності, так щоб вгорі були одні послідовності з'єднань (п-> р), а знизу протилежні (р-> п). Електричний струм протікає послідовно через всі паралелепіпеди. В залежності від напрямку струму верхні контакти охолоджуються, а нижні нагріваються — або навпаки. Контакт у якому струм тече від п до р буде охолоджуватися, а з іншої сторони з'єднання протилежне (р-> п), там контакт відповідно нагрівається. Таким чином електричний струм переносить тепло з одного боку елемента Пельтьє на протилежну і створює різницю температур.

Основні параметри, які характеризують модуль:

- $Q_{\max}$ (Вт) — холодоутворення. Визначається як вся теплова енергія, що передається без втрат з гарячої поверхні на холодну.
- $\Delta T_{\max}$ (град) — максимальна різниця температур між поверхнями модуля, яка може бути досягнена в ідеальних умовах: температура гарячої поверхні завжди $+27\text{ }^{\circ}\text{C}$, холодна не відводить тепло.
- $I_{\max}$ (А) — струм, який забезпечує в модулі різницю температур $\Delta T_{\max}$.
- $U_{\max}$ (В) — напруга яка має бути на модулі за умов наявності струму $I_{\max}$ та різниці температур $\Delta T_{\max}$.
- $R_{\text{Resistance}}$ (Ом) — електричний опір модуля постійному струму.

COP (Coefficient Of Performance) — коефіцієнт, що позначає відношення потужності охолодження до використаної електричної потужності модуля. Характеризує ККД модуля, зазвичай, має значення 0,3..0,5.

1.1.1.3 Формулювання умов, при яких можливо й доцільно реалізувати розглянутий технологічний процес.

Мета ведення процесу термічної обробки батонів ковбаси — 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 термічної обробки батонів ковбаси доцільно реалізовувати, якщо:

- є достатня кількість сировини;
- повинна бути електроенергія в колах живлення циркуляційного насоса та вентиляторів із середньостатистичними параметрами мережі;
- слід мати місце для відвантаження готового продукту.

1.1.1.4 Параметризація схеми технологічного процесу й загальна (на якісному рівні) характеристика параметрів і їх взаємозалежностей.

Технологічний процес термічної обробки батонів ковбаси є тепловим процесом, пов'язаним з передачею тепла від теплоносія (повітря) до сировини шляхом конвективного теплообміну та конденсації. Проведемо параметризацію технологічної схеми. Результати параметризації наведені на рис. 1.3.

Поз.	Найменування
Згс	повітря гаряче сухе
Звс	повітря відпрацьоване сухе
Згнв	повітря з нормалізованою вологістю
Зз	повітря атмосферне

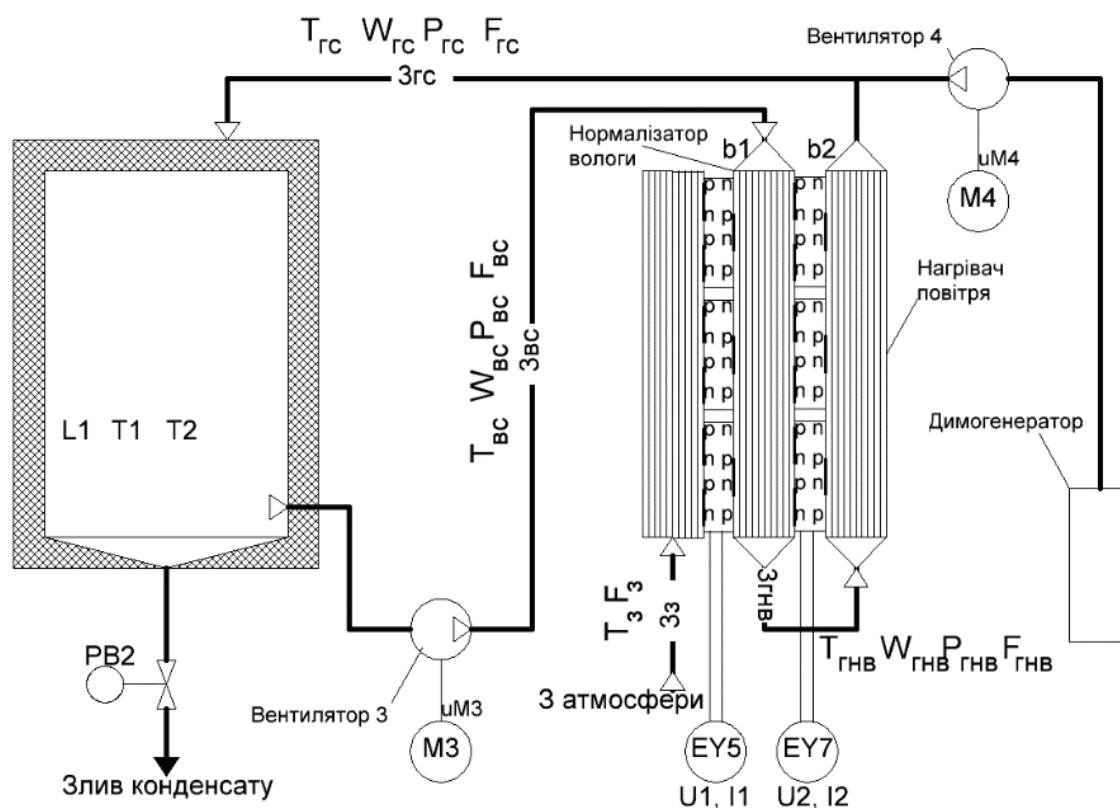


Рис. 1.3 – Параметризована технологічна схема процесу

$T_{гс}$ – Температура гарячого сухого повітря

$P_{гс}$ – Тиск гарячого сухого повітря

$W_{гс}$ – Вологість гарячого сухого повітря

$F_{гс}$ – Витрати гарячого сухого повітря

$T_{вс}$ – Температура відпрацьованого сухого повітря

$P_{вс}$ – Тиск відпрацьованого сухого повітря

$W_{вс}$ – Вологість відпрацьованого сухого повітря

$F_{вс}$ – Витрати відпрацьованого сухого повітря

$T_{гнв}$ – Гаряче з нормалізованою вологістю повітря

$P_{гнв}$ – Гаряче з нормалізованою вологістю повітря

$W_{гнв}$ – Гаряче з нормалізованою вологістю повітря

$F_{ГНВ}$ - Гаряче з нормалізованою вологістю повітря

T_3 – Температура атмосферного повітря

F_3 – Витрати відпрацьованої води

$\delta 1$ – конструкційні особливості нормалізатора вологи

$\delta 2$ – конструкційні особливості нагрівача повітря

$u1$ – струм живлення термоелектричного охолоджувача

$u2$ – струм живлення термоелектричного нагрівача

$uM3$ – робота вентилятора В3

$uM4$ - робота вентилятора В4

1.1.2 Конкретизація регламентів і умов ведення процесу, його формалізоване подання.

1.1.2.1 Виявлення нормативів ведення технологічного процесу і роботи технологічного агрегату.

Основу нормативів складають три основних регламенти.

Технологічний регламент – визначає умови, при яких у результаті технологічного процесу буде отримано продукт із заданими властивостями. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення від номіналу технологічних параметрів. Для процесу термічної обробки ковбаси в універсальній термокамері такими параметрами є температура переохолодження повітря $T_{ГНВ}$ та температура гріючого повітря $T_{Гс}$

Експлуатаційний регламент – визначає умови нормальної безаварійної роботи технологічного обладнання. Він являє собою набір номінальних значень і допусків на відхилення експлуатаційних параметрів технологічного обладнання. Для процесу термічної обробки ковбаси в універсальній термокамері такими параметрами є температура ковбаси T_2 , рівень конденсату L_1 , відносна вологість переохолодженого $W_{ГНВ}$ та догрітого $W_{Гс}$ повітря.

Техніко-економічний і екологічний регламент визначає умови ефективності ведення процесу і його екологічності. Він являє собою набір номінальних та гранично-припустимих значень техніко-економічних і екологічних параметрів. Для процесу термічної обробки ковбаси в універсальній термокамері такими

параметрами є тиск переохолодженого $P_{гнв}$ та догрітого $P_{гс}$ повітря, а також параметри повітря на виході з камери ($T_{вс}$, $W_{вс}$, $P_{вс}$, $F_{вс}$).

1.1.2.2 Аналіз наслідків виходу технологічних і експлуатаційних параметрів за регламентні допуски.

Відхилення параметрів технологічного процесу від регламентних значень, що викликані зміною параметрів, характеризують умови ведення процесу навіть при досить ефективному керуванні процесом, можуть перевищувати встановлені допуски.

Таблиця 1.1 – Таблиця регламентів

Назва параметрів	Позначення	Одиниці вимірювання	Номинальне значення параметру або ф-ція зміни номінального значення	Припустимі відхилення від номіналу		
				Тривалі ($t \leq \square$)	Короткочасні ($0 < t << \square$)	
				величина	величина	час, сек
1	2	3	4	5	6	7
Температура переохолодженого повітря	$T_{гнв}$	$^{\circ}\text{C}$	20	± 0.5	± 1	60
Температура нагрітого повітря	$T_{гс}$	$^{\circ}\text{C}$	90	± 0.5	± 5	60

1.1.2.3 Виявлення параметрів, що характеризують умови ведення технологічного процесу та експлуатації технологічного агрегату.

Поточні значення нормативних параметрів завжди відрізняються від номінальних (і можуть виходити за межі допусків) внаслідок зміни умов, у яких ведеться процес. Ці умови також характеризуються певними параметрами, які можуть бути (для зручності) згруповані за деякими ознаками.

Сировинні параметри характеризують властивості продукту, що йде на переробку. Для процесу термічної обробки ковбаси в універсальній термокамері такими параметрами є початкова температура ковбаси (T_1) та маса ковбаси (m).

Енергетичні параметри характеризують енергію, що підводить до технологічного встаткування ззовні й витрачається на зміну властивостей

продуктів. Для процесу термічної обробки ковбаси в універсальній термокамері такими параметрами є напруга та струм живлення елементів Пельте (U_1, I_1, U_2, I_2), температуру повітря в атмосфері T_3 , витрати повітря F_3 , витрати повітря $F_{гнв}$ та $F_{гс}$.

Механічні (або інші специфічні) параметри технологічного обладнання характеризують стан її робочих органів. До цієї групи параметрів віднесемо конструктивні особливості нормалізатора вологості та нагрівача повітря (δ_1, δ_2), а також роботу приводів вентиляторів (u_{M3}, u_{M4}).

1.1.2.4 Формалізація параметризованої схеми технологічного процесу і одержання його параметричної схеми.

Параметризована схема ТП має змістовний характер. Формалізація опису взаємозв'язків між параметрами ТП досягається за рахунок переходу до формалізованої параметричної схеми ТП. При цьому ті параметри, які відображають мету функціонування об'єкту моделювання та додаткових вимог до нього, тобто регламентовані параметри будуть вихідними, а параметри, що відображають умови функціонування об'єкту - вхідними.

Зв'язок між вхідними і вихідними параметрами – причинно-наслідковий. У рамках даної схеми ці зв'язки задаються тільки на якісному рівні, згодом деякими зв'язками можна буде знехтувати, деякі представити опосередковано.

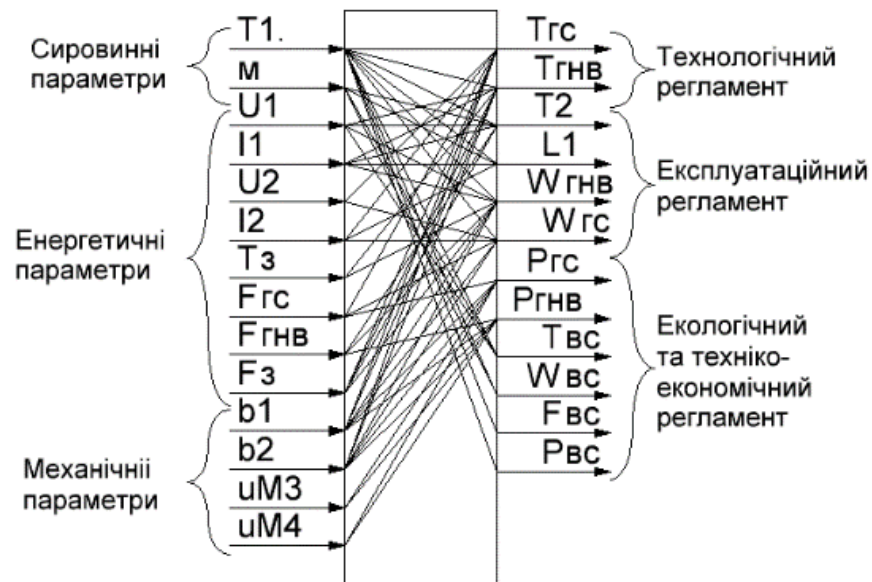


Рис. 1.4 – Параметрична схема процесу термічної обробки ковбаси в універсальній термокамері

1.1.3 Розробка структурної (координатної) схеми об'єкта керування

1.1.3.1 Конкретизація мети і завдань керування об'єктом, виявлення регульованих координат.

Загальною метою функціонування підприємства в цілому є виконання планових завдань або договірних зобов'язань щодо номенклатури та обсягу продукції, а також отримання при цьому певного економічного ефекту.

Декомпозиція загальної мети функціонування підприємства для більш низьких рівнів виробничої ієрархії приводить до наступних цілей:

- а) на рівні окремого технологічного процесу – координація роботи технологічного обладнання, на якому реалізується процес;
- б) на рівні окремих одиниць технологічного обладнання – виконання технологічних, експлуатаційних і техніко-економічних регламентів, зокрема – оптимізація роботи окремих одиниць обладнання.

Звідси задачу керування можна розділити на:

- а) задачу регулювання, коли необхідно забезпечити виконання вимог регламенту;
- б) завдання умовної оптимізації, коли при дотриманні вимог регламенту

додатково відповідно до наперед сформульованим критерієм, вирішуються задачі оптимізації процесу.

Для процесу термічної обробки ковбаси в універсальній термокамері в якості регульованих координати доцільно обрати температуру переохолодженого повітря $T_{гнв}$, температуру догрітого повітря $T_{гс}$.

1.1.3.2 Вибір керуючих дій об'єкту керування.

Необхідною умовою вирішення задач керування є наявність управляючих дій, що повинні бути входними змінними (координатами) ОК. Для задач регулювання, такими управляючими діями, насамперед, є дії, що цілеспрямовано можуть змінювати витрати матеріальних і енергетичних потоків, а саме – положення регулювальних органів. Кількість управляючих дій повинно бути рівним кількості регульованих змінних.

Для процесу термічної обробки ковбаси в універсальній термокамері до керуючих дій доцільно віднести струм живлення термоелектричних елементів Пельтьє термоелектричного охолоджувача (I_1), струм живлення термоелектричних елементів Пельтьє термоелектричного нагрівача (I_2).

1.1.3.3 Виділення та класифікація збурень об'єкта керування.

Після того, як визначені управляючі дії, всі інші входні змінні відносять у розряд збурень, тобто таких дій середовища, зміна яких порушує хід технологічного процесу і режими роботи технологічного агрегату. Для процесу термічної обробки ковбаси в універсальній термокамері всі інші входні змінні, окрім керуючих, дій віднесемо до неконтрольованих збурень.

1.1.3.4 Складання структурної (координатної) схеми об'єкту регулювання.

Виділимо дві задачі регулювання:

- Стабілізація температури переохолодження повітря $T_{гнв}$;
- Стабілізація температури гріючого повітря $T_{гс}$;

Управляючі дії об'єкту керування:

- U_1 зміна потужності термоелектричного охолоджувача

- U2 зміна потужності термоелектричного нагрівача

Всі вхідні дії, крім управляючої дії віднесемо до неконтрольованих збурень. Детерміновану складову цих збурень адитивно прикладемо до управляючих дій, а стохастичну складову – до регульованої координати.

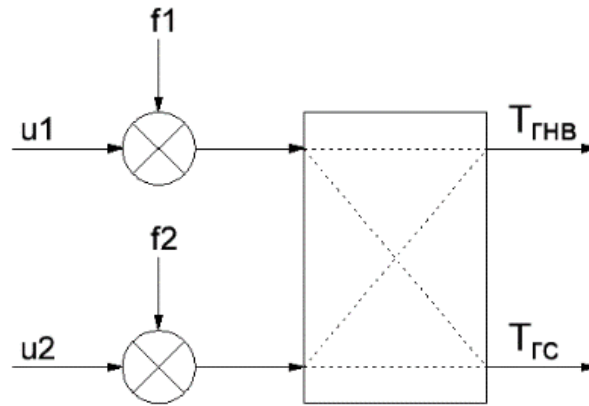


Рис. 1.5 – структурна схема ОК

Структурна схема об'єкта зображена на рисунку 2.1.

U1 - зміна потужності термоелектричного охолоджувача;

U2 - зміна потужності термоелектричного нагрівача;

Tгнв - Стабілізація температури переохолодження повітря;

Tгс - Стабілізація температури гріючого повітря;

f1, f2 – неконтрольовані збурення.

1.2 Розробка та реалізація комплексу моделей процесу каталітичної очистки газових сумішей як об'єкту керування

1.2.1 Розробка та реалізація математичної моделі процесу варки та гарячого копчення ковбас з використанням термоелектричного теплового насосу як об'єкту керування.

1.2.1.1 Розробка структурної схеми математичної моделі процесу варки та гарячого копчення ковбас з використанням термоелектричного теплового насосу як об'єкту керування.

Перед розробкою моделі в цілому виконаємо декомпозицію технологічної установки на окремі вузли і розглянемо загальну структуру його математичної

моделі з основними взаємозв'язками між моделями окремих вузлів лабораторної установки у відповідності з рисунком 1.6.

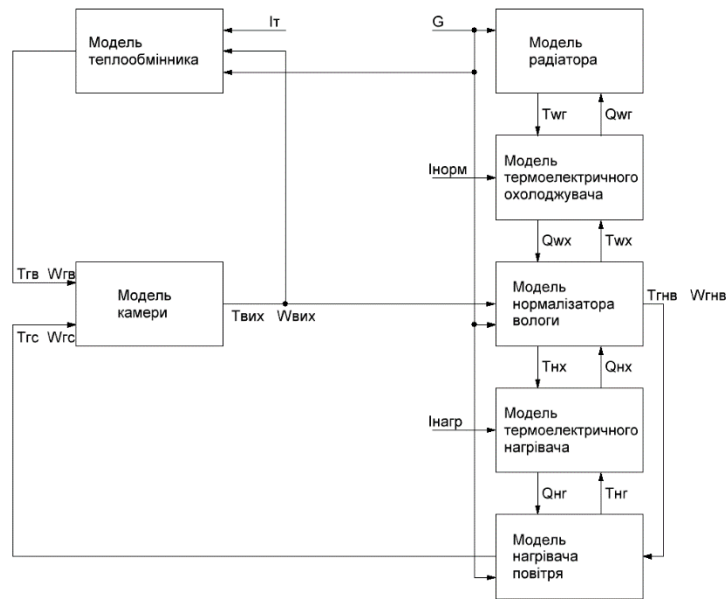


Рисунок 1.6 – Структурна схема моделі лабораторної установки

Де: G – Витрати повітря

T_{wg} – Температура гарячої сторони термоохолоджувача

Q_{wg} – Тепловий потік від гарячої сторони термоохолоджувача

Q_{wx} – Тепловий потік холодної сторони термоохолоджувача

T_{wx} – Температура холодної сторони термоохолоджувача

T_{hx} – Температура холодної сторони термоелектричного нагрівача

Q_{hx} – Тепловий потік від холодної сторони термоелектричного нагрівача

$T_{нг}$ – Температура гарячої сторони термоелектричного нагрівача

$T_{гнв}$ – Температура гарячого повітря з нормалізованою вологістю

$W_{гнв}$ – Відносна вологість гарячого повітря з нормалізованою вологістю

$I_{норм}$ – Струм живлення термоелектричного охолоджувача

$I_{нагр}$ – Струм живлення термоелектричного нагрівача

I_t – Струм живлення теплообмінника

$T_{гв}$ – Температура гарячого вологого повітря

$T_{гс}$ – Температура гарячого сухого повітря

$W_{гс}$ – Відносна вологість гарячого вологого повітря

$W_{гв}$ – Відносна вологість гарячого сухого повітря

T вих – Температура повітря на виході з камери

W вих – Відносна вологість повітря на виході з камери

1.2.1.2 Фізичні залежності використані при розробці математичної моделі процесу каталітичної очистки газових сумішей як об'єкту керування.

Елемент Пельтьє — це термоелектричний перетворювач, принцип дії якого базується на ефекті Пельтьє — виникненні різниці температур при протіканні електричного струму.

Принцип дії. В основі роботи елементів Пельтьє лежить контакт двох струмопровідних матеріалів з різними рівнями енергії електронів у зоні провідності. При протіканні струму через контакт таких матеріалів, електрон повинен отримати енергію, щоб перейти у більш високоенергетичну зону провідності іншого напівпровідника. При поглинанні цієї енергії відбувається охолодження місця контакту напівпровідників. При протіканні струму в зворотному напрямку відбувається нагрівання місця контакту напівпровідників, додатково до звичайного теплового ефекту.

При контакті металів ефект Пельтьє настільки малий, що непомітний на тлі омичного нагріву і явищ теплопровідності. Тому при практичному застосуванні використовуються контакт двох напівпровідників.

Елемент Пельтьє складається з однієї або більше пар невеликих напівпровідникових паралелепіпедів — одного N-типу і одного р-типу в парі, які попарно з'єднані за допомогою металевих перемичок у відповідності з рисунком 1.7.



Рисунок 1.7 - Схема дії елемента Пельть'є

Металеві перемички одночасно служать термічними контактами і ізолювані непровідною плівкою або керамічною платівкою. Пари паралелепіпедів з'єднуються таким чином, що утворюється послідовне з'єднання багатьох пар напівпровідників з різним типом провідності, так щоб вгорі були одні послідовності з'єднань ($n > p$), а знизу протилежні ($p > n$). Електричний струм протікає послідовно через всі паралелепіпеди. В залежності від напрямку струму верхні контакти охолоджуються, а нижні нагріваються — або навпаки. Таким чином електричний струм переносить тепло з одного боку елемента Пельтьє на протилежну і створює різницю температур.

Термоелектричний перетворювач являється реверсивним та може працювати в режимах нагрівача, охолоджувача або електрогенератора. Як правило елементи Пельть'є виконують охолоджуючу функцію. У режимі отримання холоду на термоелементі проявляється ряд ефектів, які необхідно врахувати при його моделюванні, такі як ефект Пельть'є, Джоуля.

Модель складається з двох джерел струму залежних від напруги, два поточних залежних джерел струму і двох із зосередженими параметрами у відповідності з рисунком 1.8.

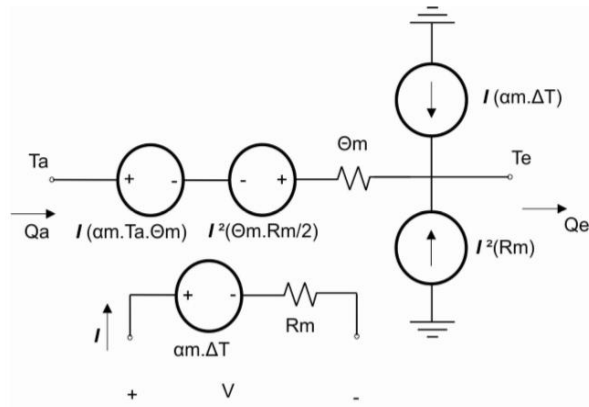


Рисунок 1.8 – Модель елемента Пельтьє

Де: Q_a - поглинене тепло;

Q_e - випромінювальне тепло;

P - електрична потужність, яка споживається при

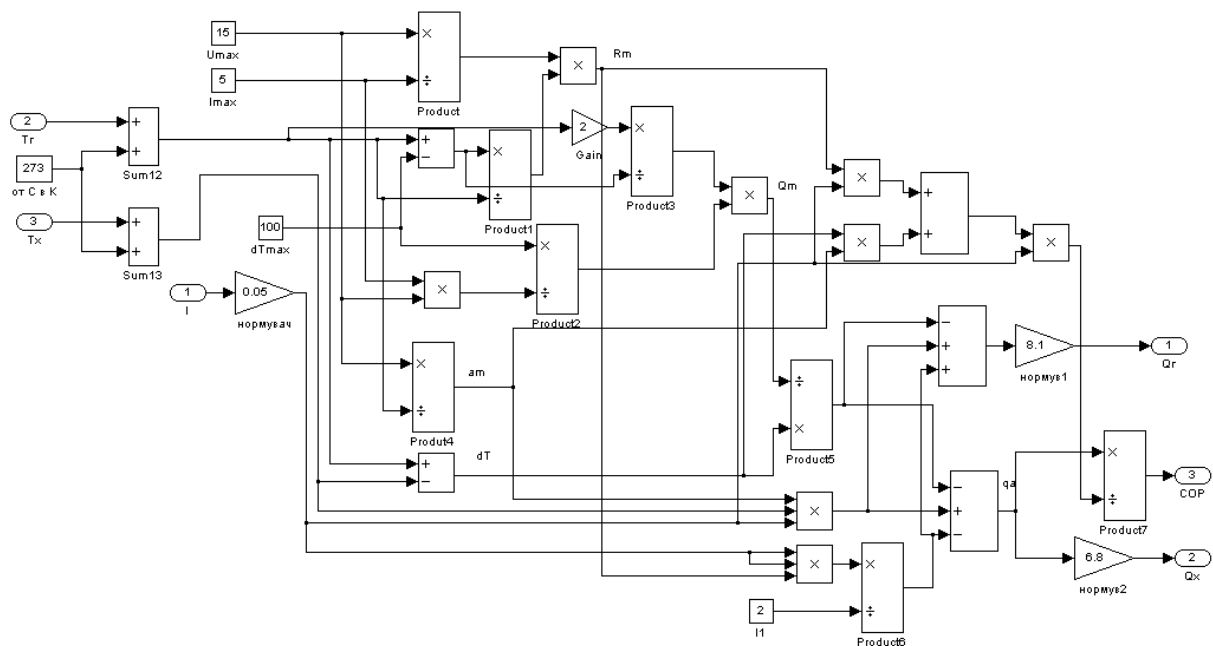


Рисунок 1.9 – Модель термоелемента Пельтьє в програмі Matlab пакеті Simulink

Вхідними даними в модель термоелемента будуть його температури T_x – холодної, T_r - гарячої сторін, та I - струм споживання.

Виходами будуть його теплові потоки які він вбирає та віддає (Q_x , Q_r). Також в середині моделі задаються: ΔT_{max} , I_{max} , V_{max} .

1.2.1.3. Розробка математичної моделі батону ковбаси. Для описування моделі водяної сорочки скористуємося наступними залежностями:

1. Рівняння теплового балансу:

$$Q = cm\Delta t \text{ [Вт]} \quad (2.8)$$

c – теплоємкість речовини;

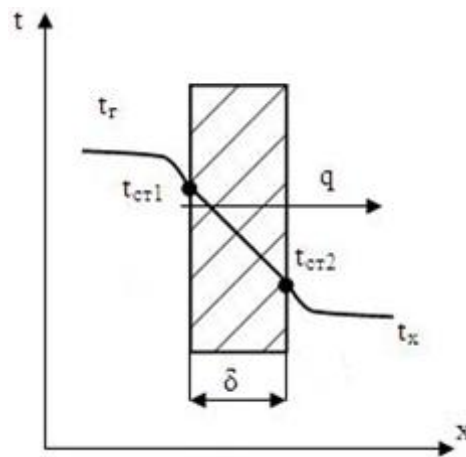
$$\Delta t = t_1 - t_2$$

t_1 – температура до нагрівання;

t_2 – температура після нагрівання.

2. Теплопередача через плоску стінку

Теплопередачою називається процес перенесення теплоти від більш нагрітого ("гарячого") теплоносія до менш нагрітого ("холодного") теплоносія через роздільну стінку. Це представлено на рисунку 2.6.



Рисунку 1.10 – Характер зміни температур в теплоносіях та стінках

Де: q – тепловий потік від гарячого теплоносія до холодного;

$t_{ст1}$, $t_{ст2}$ – температури стінки з гарячої та холодної сторони відповідно;

t_r і t_x – температура гарячого і холодного теплоносія;

$\Delta t = t_r - t_x$ – температурний напір;

δ – товщина стінки.

Для розрахунку теплового потоку через плоску стінку скористуємося наступною залежністю

$$Q = k_n \cdot F \cdot (t_{ст1} - t_{ст2}) = \frac{\lambda}{\delta} \cdot F \cdot (t_{ст1} - t_{ст2}) \quad (2.9)$$

Де: λ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності,

F – площа поверхні плоскої стінки,

k_n – коефіцієнт теплопередачі Вт/(м²·К).

3. Тепловий потік від теплоносія до плоскої стінки при конвективному теплообміні

$$Q = F * a * \Delta T$$

Де: F – площа поверхні плоскої стінки;

a - коефіцієнт теплопередачі Вт/(м²·К) в залежності від швидкості руху середовища відносно стінки;

T – різниця температур між середовищем та стінкою

В даній моделі будемо розглядати батон як плоску стінку, тепловий потік підводиться до поверхні, температура з іншого боку стінки буде температурою в центрі батону.

Опишемо модель зміни температури центру(2,10) батону ковбаси та температуру поверхні(2,11) ковбаси наступними рівняннями:

$$T_{\text{ц}} = \int \frac{(T_{\text{пов}} - T_{\text{ц}}) * F_{\text{б}} * R_{\text{б}}}{h_{\text{б}} * c_{\text{б}} * m_{\text{б}}} + T_o \quad (2,10)$$

$$T_n = \int \frac{(T_g - T_{\text{нов}}) * a * F_{\text{б}} - \frac{(T_{\text{пов}} - T_{\text{ц}}) * F_{\text{б}} * R_{\text{б}}}{h_{\text{б}}}}{c_{\text{б}} * m_{\text{б}}} \quad (2,11)$$

Реалізуємо модель батону в програмі Matlab в пакеті Simulink відповідності з рисунком 2.7.

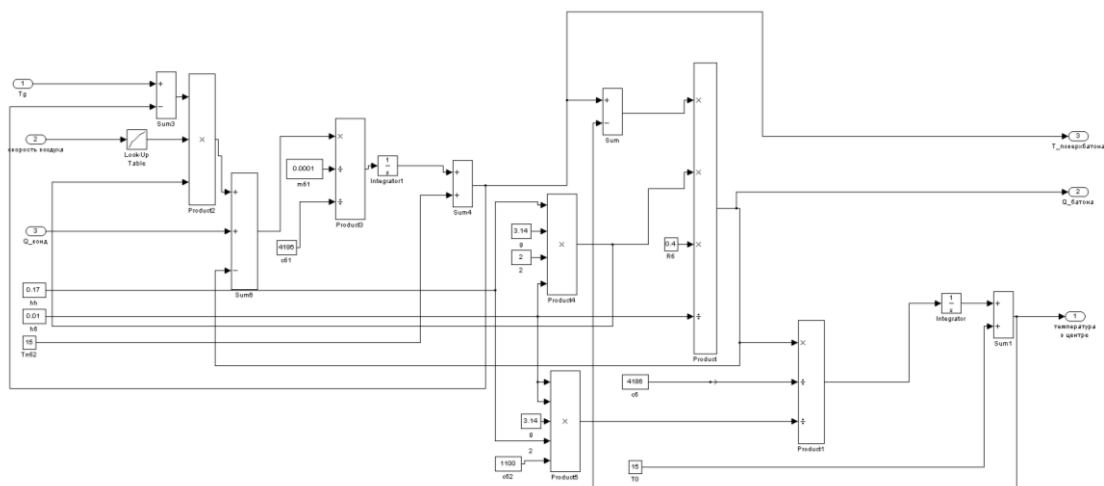


Рис. 1.11 - Модель батону в програмі Matlab пакеті Simulink

Вхідними параметрами будуть довжина батону ковбаси h та радіус батону ковбаси, а також швидкість руху повітря в камері відносно батону ковбаси, температура підведеного повітря T_g та тепловий потік в результаті конденсації (дорівнює нулю під час жарки). На виході моделі розраховано тепловий потік від поверхні до центру батону, температура центру батону та температура поверхні батону.

1.2.1.4 Розробка математичної моделі термокамери.

В даній моделі розглянемо втрати тепла в навколишнє середовище і охолодження гріючого повітря на виході з термокамери. Для цього скористаємося рівняннями теплового балансу, теплопередачі через плоску стінку та теплопередачі при конвективному теплообміні.

Опишемо модель наступними рівняннями витрати тепла в навколишнє середовище

$$Q_{oc} = \frac{(\int \frac{(T_g - T_H) * a * F_k + Q_{uc} + Q_{oc}}{m_H + c_H} - T_H) * F_k * R_k}{h_k} \quad (2,12)$$

Реалізуємо модель витрат тепла в навколишнє середовище в програмі Matlab в пакеті Simulink відповідності з рисунком 1.12.

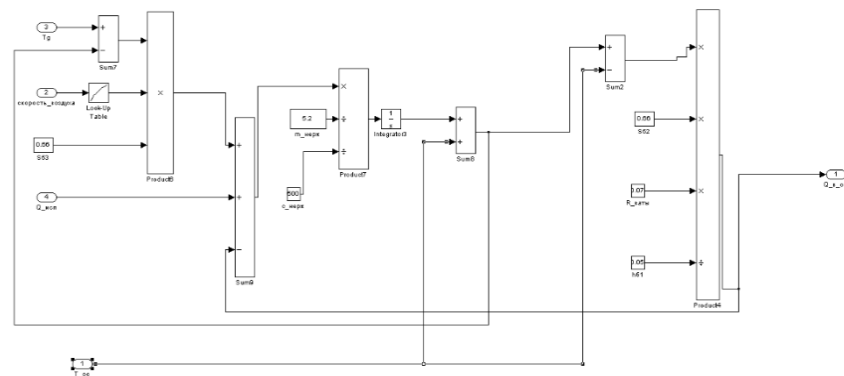


Рис. 1.12 - модель витрат тепла в навколишнє середовище в програмі Matlab в пакеті Simulink

Для даної моделі вхідними даними будуть параметри камери (площа внутрішньої поверхні камери F , та товщина теплоізоляційного шару мінеральної вати), температура підведеного повітря T_g та швидкість руху повітря відносно стінок камери. Вихідним параметром буде тепловий потік – втрати – в навколишнє середовище.

$$T_{\text{ВОЗД_ВИХ}} = T_g - \frac{Q_{oc} + Q_6 + Q_{uc}}{v_{\text{ВОЗД}} + F_{\text{ВОЗД}} + p_{\text{ВОЗД}} + c_{\text{ВОЗД}}} \quad (2,13)$$
[illegible]

Для даної моделі вхідними параметрами будуть тепловий потік на нагрівання батону ковбаси $Q_{\text{батону}}$, втрати в навколишнє середовище та тепловий потік на випаровування зайвої вологи з ковбасного батону та температура підведеного повітря T_g . На виході рахується температура на виході з камери $T_{\text{возд вих}}$.

Реалізація моделі термокамери в програмі Matlab в пакеті Simulinky відповідності з рисунком 1.14.

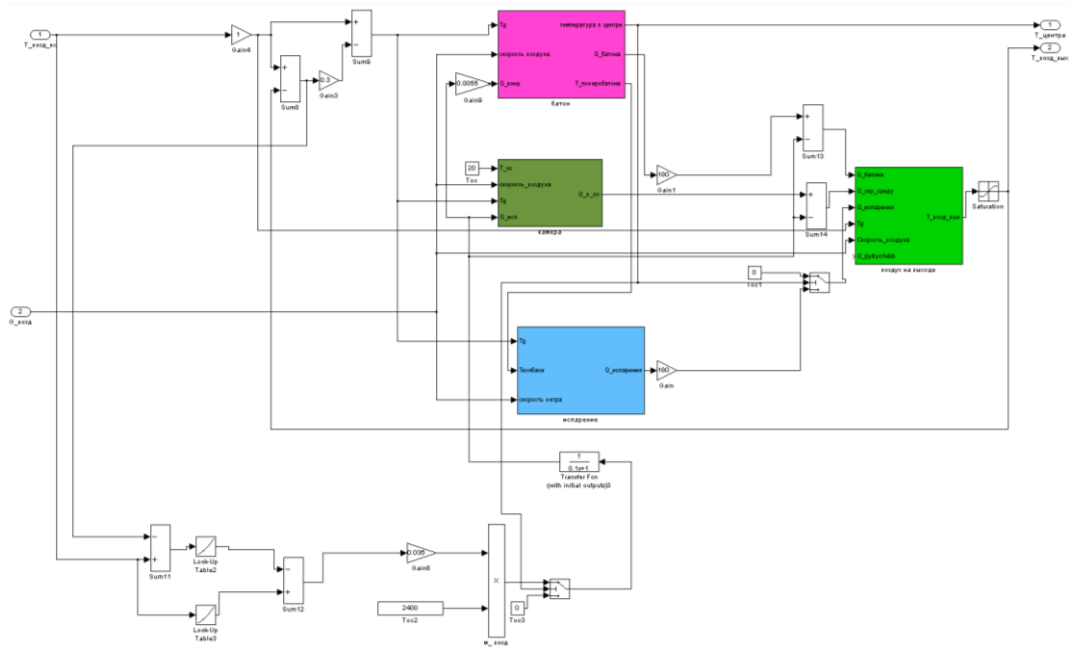


Рис. 1.14 - моделі термокамери в програмі Matlab в пакеті Simulink

1.2.1.5 Розробка математичної моделі теплообмінника нагрівача повітря та нормалізатора вологи

В даній моделі розглянемо передачу/відбір тепла від гарячої/холодної сторони пельтьє через алюмінієвий радіатор до повітря. Для цього скористаємося рівняннями теплового балансу, теплопередачі через плоску стінку та теплопередачі при конвективному теплообміні. Опишемо температуру кожної зі сторін елемента пельтьє(2,14) та також температуру вихідного повітря(2,15) наступними рівняннями:

$$T_{\text{гп}} = T_{\text{ал}} + \frac{Q_{\text{rn}} * F_{\text{ал}} * R_{\text{ал}}}{h_{\text{ал}}} \quad (2,14)$$

$$T_{\text{возд_вих}} = \frac{\left(\int \frac{Q_{\text{rn}} - (T_{\text{ал}} - T_{\text{возд_вих}}) * F_{\text{ал}} * a}{P_{\text{ал}} * L_{\text{ал}} * h_{\text{ал}} * P_{\text{ал}} * c_{\text{ал}}} + T_{\text{возд_вих}} \right) - T_{\text{возд_вих}}}{m_{\text{возд}} * C_{\text{возд}}} \quad (2,15)$$

Реалізація моделі частини теплообмінника нагрівача повітря та нормалізатора вологи в програмі Matlab в пакеті Simulink відповідності з рисунком 1.15.

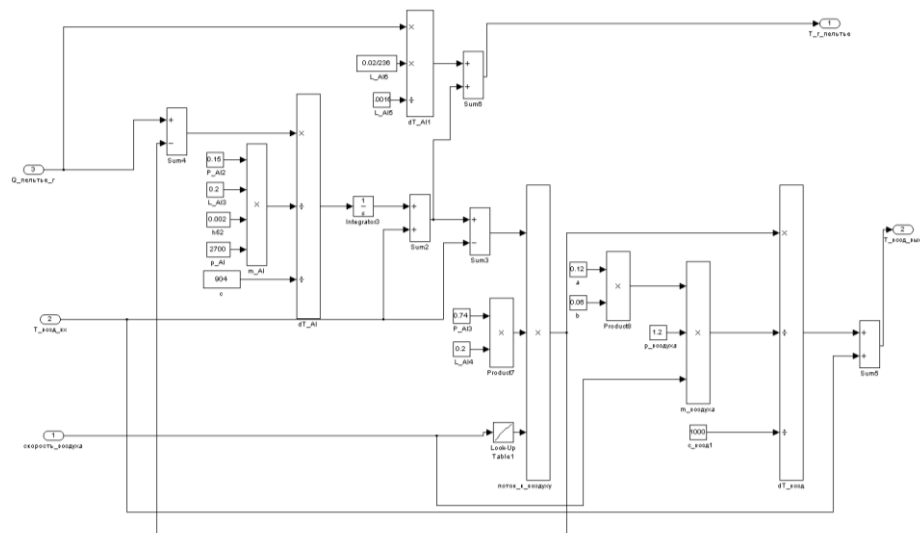


Рис. 1.15 - модель частини теплообмінника нагрівача повітря та нормалізатора вологи в програмі Matlab в пакеті Simulink

Вхідними даними є температура вхідного повітря $T_{\text{возд_вх}}$ (температура холодної та гарячої сторони розраховуються за однаковими принципами), швидкість руху повітря та тепловий потік від пелть'є. На виході модель розраховує значення температури стінки пелть'є та температуру повітря на виході з теплообмінника.

Для зручності подальшої роботи представимо частину теплообмінника, описаного вищевказаною моделлю, у вигляді одного блоку та об'єднаємо термоелемент пелть'є та частину теплообмінника, відповідна йому (рис. 2,12)

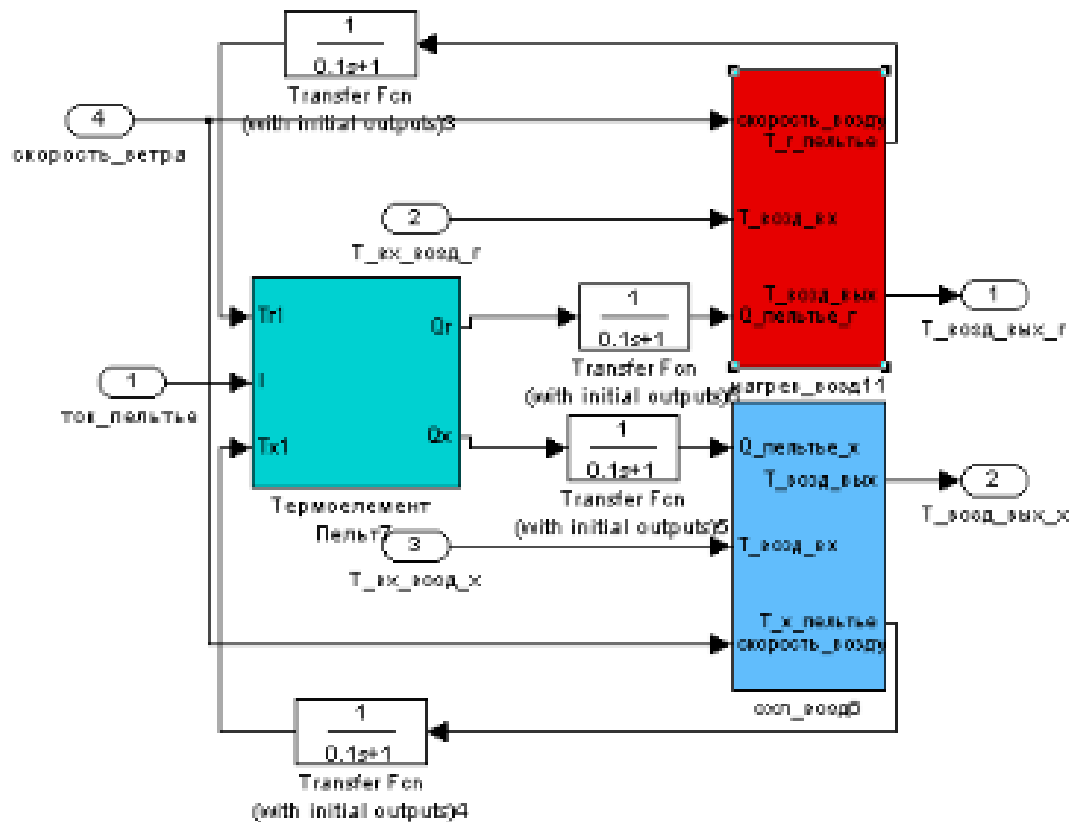


Рис. 1.16 - термоелемент пельт'є та частина теплообмінника, відповідна йому

Відповідно до попередніх розрахунків редставимо кожен елемент пельт'є зі стінками у вигляді одного блоку, входними параметрами якого будуть температура повітря на вході холодної та гарячої сторін $T_{vx_voz_d_x}$ та $T_{vx_voz_d_g}$, струм живлення термоелементу та витрати повітря у трубопроводі; вихідними параметрами будуть температура повітря на виході з холодної та гарячої сторони $T_{vih_voz_d_x}$ та $T_{vih_voz_d_g}$. Об'єднаємо елемент пельт'є та дві його сторони в один блок для зручності подальшої роботи та об'єднаємо їх між собою у нагрівач повітря та нормалізатора вологи.

Реалізація моделі теплообмінника нагрівача повітря та нормалізатора вологи в програмі Matlab в пакеті Simulinkу у відповідності з рисунком 2.13.

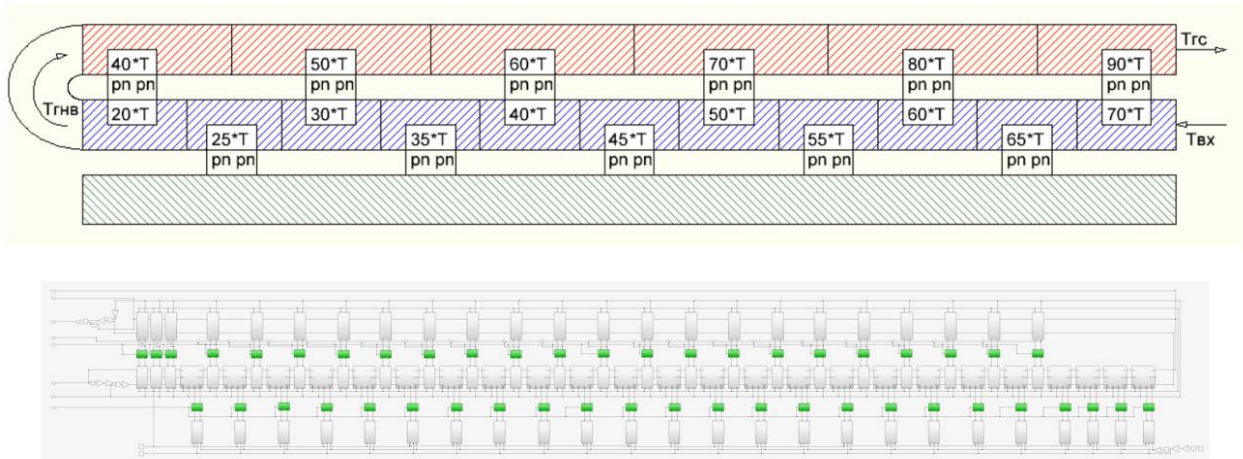


Рис. 1.17 - модель теплообмінника нагрівача повітря та нормалізатора вологості в програмі Matlab в пакеті Simulink

Для представленої моделі вхідними параметрами будуть температура атмосферного повітря, температура вхідного повітря, витрати повітря, струм живлення термоелектричного нагрівача (u_1) та струм живлення термоелектричного охолоджувача (u_2)

1.2.2 Отримання перехідних та квазістатичних характеристик моделі та обґрунтування її адекватності.

1.2.2.1 Отримання квазістатичних характеристик моделі та обґрунтування її адекватності.

Експериментальне отримання статичних режимів будь-якого ОК класичними методами припускає допустиму кількість рівнів змінних для таких режимів, перехід між якими здійснюється в динамічних режимах. Це призводить до втрати інформації між вибраними рівнями для нормалізатора вологості та нагрівача повітря, робота яких включає фазові переходи речовини та газу, дискретизація статичних характеристик може не дозволити виявити точки змінних принципово важливих режимів. Крім того, організація класичного експерименту для отримання статичних характеристик достатньо важка, потребує значних затрат часу на перехідні процеси і підтвердження початку нового статичного процесу. Враховуючи викладене, для вивчення статичних властивостей моделі нормалізатора вологості та нагрівача повітря, були

організовані експерименти, які можна розглядати як отримання квазістатичних характеристик. Їх суть складається в почерговій зміні з постійною, заранне вибраною, швидкістю значення струму до термоелектричних підігрівача та охолоджувача від 0-12А і реєстрації змінних при цьому температур в контрольних точках об'єкту ($T_{гнв}$ - температура переохолодженого повітря, $T_{гс}$ - температура догрітого повітря).

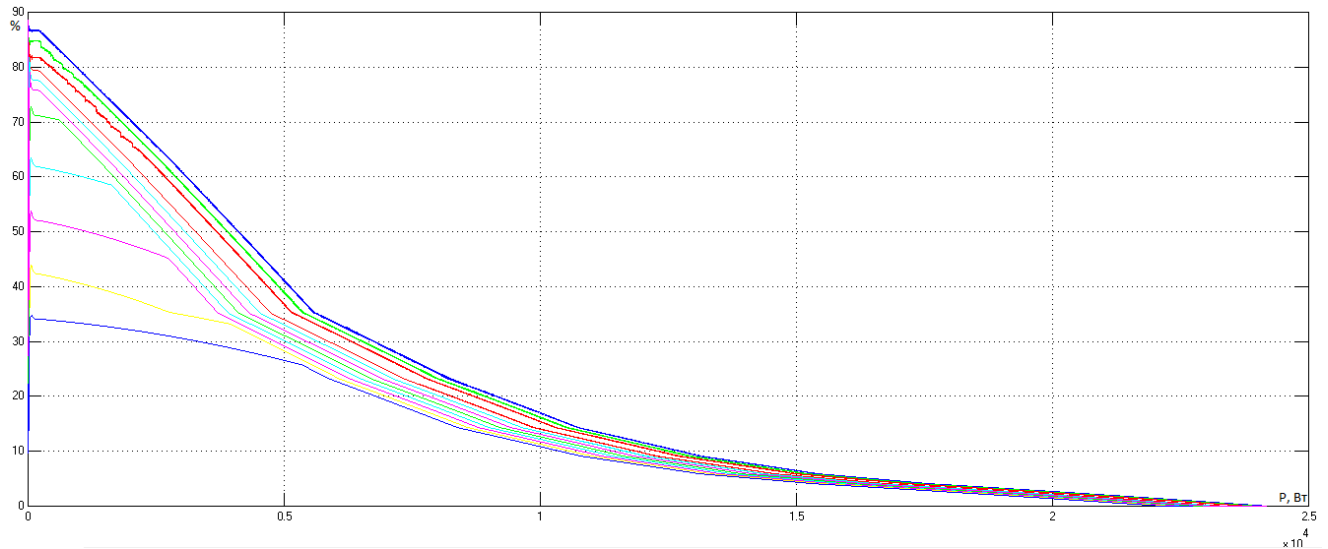


Рис 1.17.1 - квазістатичні залежності відносної вологості повітря на виході з нагрівача від потужності живлення нагрівача при різних температурах повітря на вході в теплообмінник

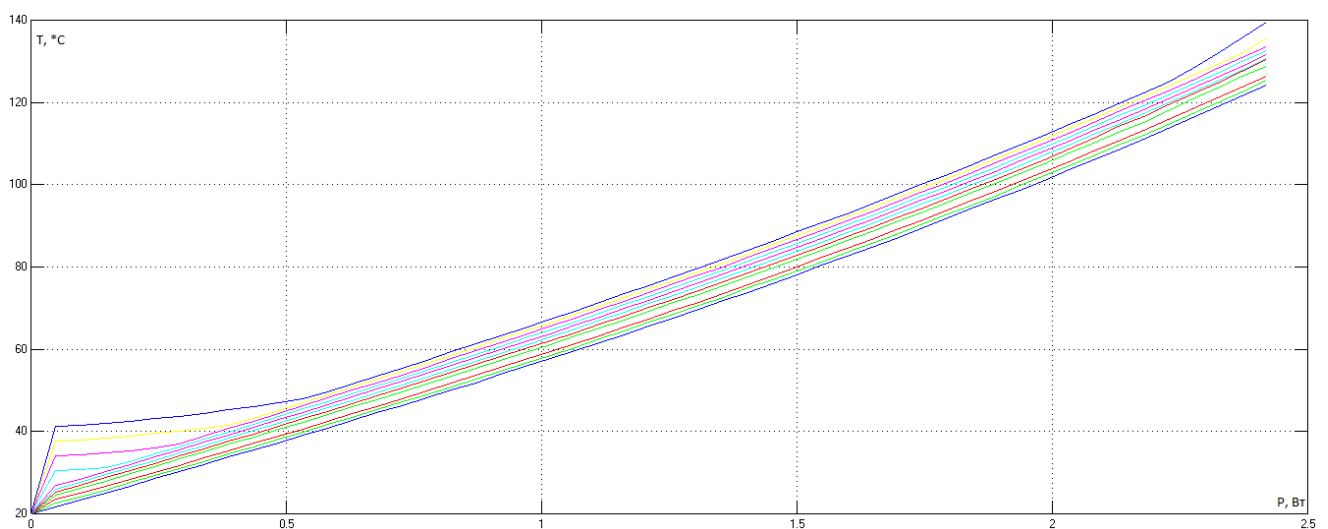


Рис 1.17.2 – квазістатичні залежності температури повітря на виході з нагрівача від потужності живлення нагрівача при різних температурах повітря на вході в теплообмінник

Як видно з графіків, нелінійність об'єкту є суттєвою, до того ж елементам

Пельт'є властива певна відмінність реальних технічних характеристик від заявлених(паспортних). Ці фактори зумовлюють певну невизначеність властивостей універсальної термокамери як об'єкту керування.

1.2.2.2 Отримання перехідних характеристик та параметрична ідентифікація моделей першого порядку основних каналів перетворення.

Проведення параметричної ідентифікації моделей першого та другого порядків за каналом $U_1 - T_{гнв}$.

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

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta T_{гнв}}{\Delta u} = \frac{-18,64 - (-15,1)}{40 - 30} = -0,33 \text{ } ^\circ\text{C} / \% \text{х.р.о.}$$

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

Для моделі 1-го порядку

$$\square T_{гнв\ 1,0} = -18,64 - (-15,1) = -3,54^\circ\text{C};$$

$$T_{гнв\ 0,33} = 0,33 \cdot (-3,54) + (-15,1) = -16,26^\circ\text{C};$$

$$T_{дв\ 0,7} = 0,7 \cdot (-3,54) + (-15,1) = -17,57^\circ\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 2.19), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$.

$$t_{0,33} = 7,55\text{с};$$

$$t_{0,7} = 19,8\text{с}.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 7,55 - 19,8) = 1,425\text{с}$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (19,8 - 1,425) / 1,2 = 15,3\text{с}$$

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

$$W_0(p) = \frac{-0,33 \cdot e^{-1,425p}}{15,3p + 1}$$

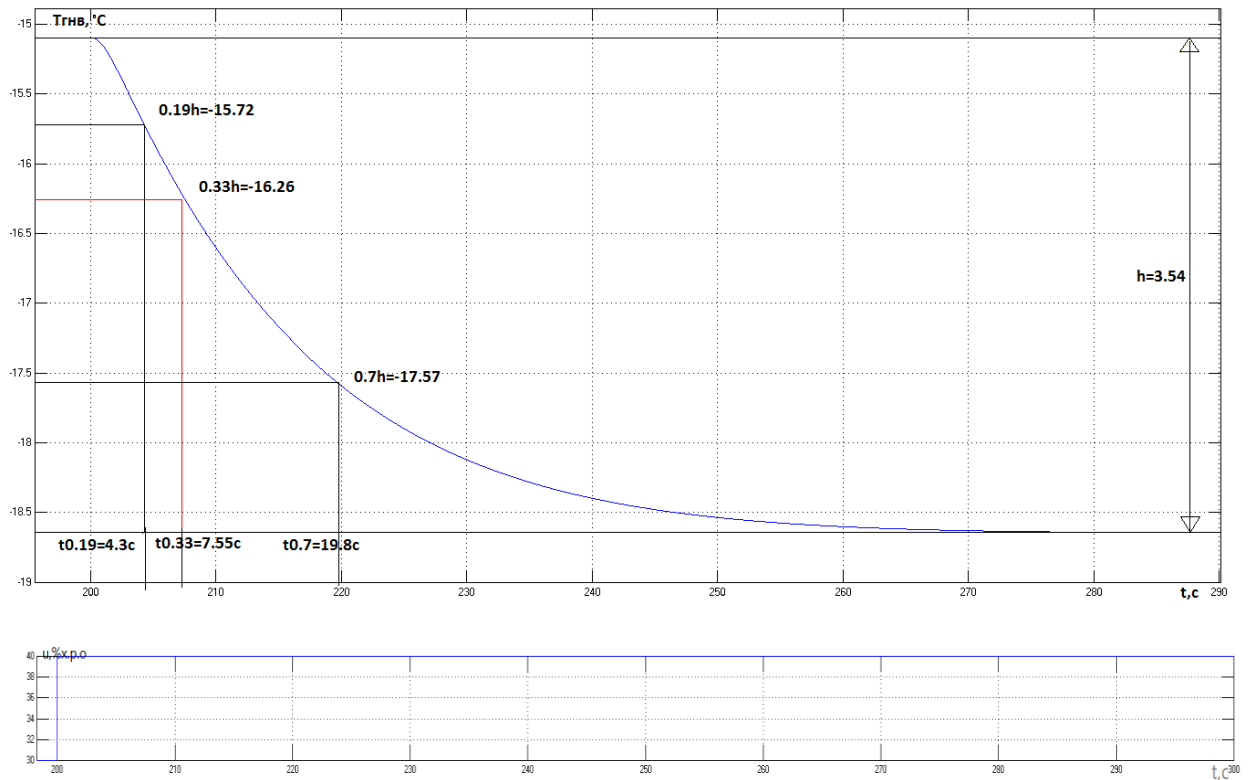


Рис. 1.18 – Параметрична ідентифікація моделі ОК $U_1 - T_{\text{гнв}}$

Проведення параметричної ідентифікації моделей першого та другого порядків за каналом $U_2 - T_{\text{гс}}$.

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

Коефіцієнт передачі ОК визначають за формулою:

$$K_0 = \frac{\Delta T_k}{\Delta u} = \frac{23,3 - 16,78}{40 - 30} = 0,65 \text{ } ^\circ\text{C} / \% \text{х.р.о.}$$

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

Для моделі 1-го порядку

$$\square T_{zc\ 1,0} = 23,31 - 16,78 = 6,53^\circ\text{C};$$

$$T_{к\ 0,33} = 16,78 + 0,33 \cdot 6,53 = 18,93^\circ\text{C};$$

$$T_{к\ 0,7} = 16,78 + 0,7 \cdot 6,53 = 21,35^\circ\text{C};$$

Проводимо графічні побудови (див. рис. 2.20), знаходимо $t_{0,33}$ і $t_{0,7}$.

$$t_{0,33} = 9c;$$

$$t_{0,7} = 26,6c.$$

Тоді

$$\tau_0 = 0,5 \cdot (3 \cdot t_{0,33} - t_{0,7}) = 0,5 \cdot (3 \cdot 9 - 26,6) = 0,27c$$

$$T_0 = (t_{0,7} - \tau_0) / 1,2 = (26,6 - 0,27) / 1,2 = 21,9c$$

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

$$W_0(p) = \frac{0,65 \cdot e^{-0,27p}}{21,9p + 1}$$

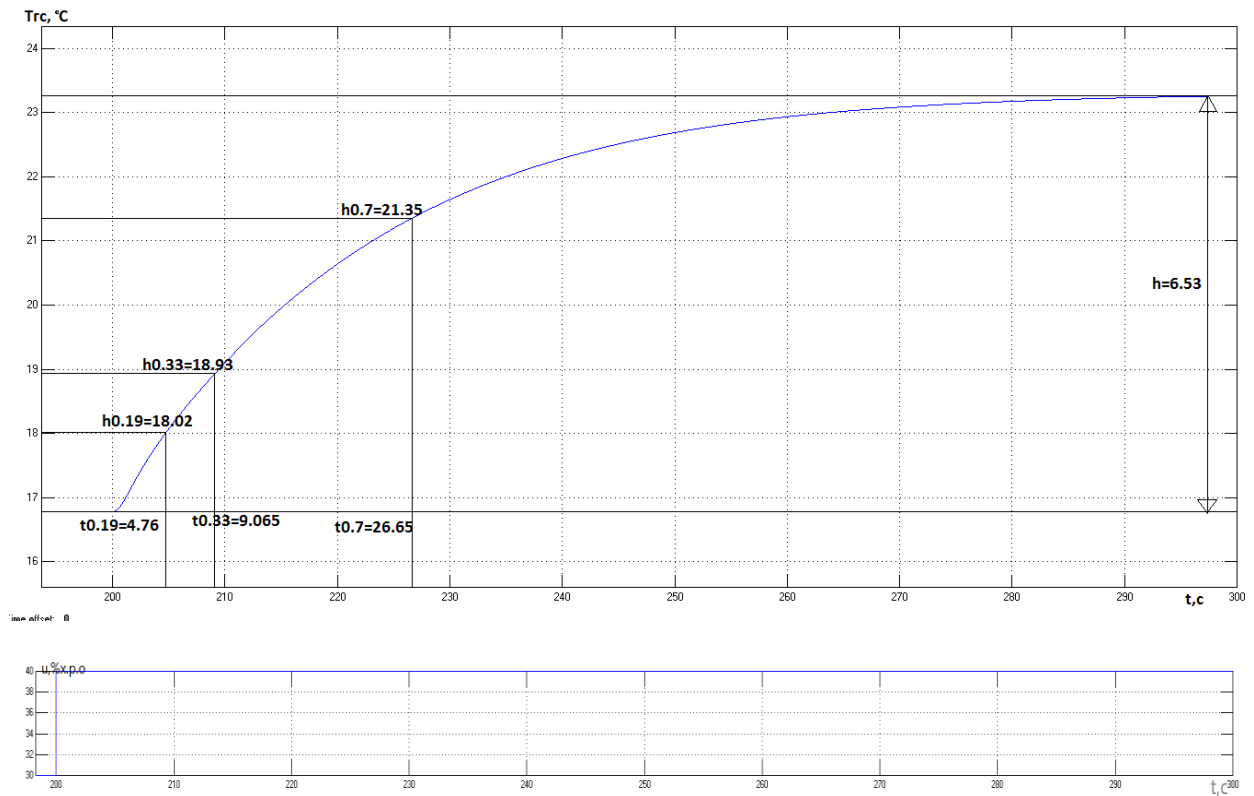


Рис. 1.19 – Параметрична ідентифікація моделі ОК $U_2 - T_{Гс}$

Канал ОК	Модель динаміки
u1 - ТГс	$W_o^{ТГс}(p) = \frac{0.07 * e^{-4.2p}}{22.7p + 1}$
u2 - ТГНВ	$W_o^{ТГНВ}(p) = \frac{1.15 * e^{-16.5p}}{22.7p + 1}$
u1 - ТГНВ	$W_k^{ТГНВ}(p) = \frac{-0.04 * e^{-67.3p}}{67.25p + 1}$
u2 - ТГс	$W_k^{ТГс}(p) = \frac{0.04 * e^{-13.5p}}{14.25p + 1}$

1.3 Формулювання задач керування, вимог до їх розв'язку і вибір основних принципів побудови автоматичних систем

1.3.1 Формулювання задач керування технологічним агрегатом.

1.3.1.1 Декомпозиція загальної задачі керування технологічним агрегатом і формулювання окремих задач.

Загальною метою керування є керування матеріальними та енергетичними потоками для отримання властивостей продукту необхідного виду і якості.

Із загальної мети керування можна виділити окремі задачі:

- підтримання вихідних змінних об'єкту керування ($T_{гнв}$, $T_{гс}$) на її заданому значенні ($T_{гнв}^{зд}$, $T_{гс}^{зд}$) - задача регулювання.

- пристосування в процесі роботи об'єкту управління до його змінних властивостей - задача адаптації;

- забезпечення ефективних режимів роботи об'єкту керування - задача оптимізації;

- забезпечити ввімкнення і вимкнення при пусках, зупинках, аварійних ситуаціях - задача логічного керування.

1.3.1.2 Обґрунтування необхідності та автоматизації кожної із окремих задач керування.

Необхідно й доцільно автоматизувати кожен із задач керування.

Для задачі регулювання автоматизація необхідна для автоматичного регулювання заданих змінних в околицях бажаного значення із заданою точністю без фізичної участі людини.

Для якісної і економічно доцільною реалізації технологічного процесу каталітичної очистки газових сумішей необхідно регулювати температури на виходах з газового нагрівача та реактору.

Для задачі адаптації необхідно автоматизувати пристосування в процесі роботи об'єкта керування до його властивостей, що змінюються.

Для задачі оптимізації необхідно автоматизувати пошук оптимального проходження процесу, мінімізувати витрати енергії, збільшити ефективність ведення ТП, збільшити продуктивність обладнання.

Режими пуску та зупинки є неекономічними режимами роботи установки. Підвищення економічної ефективності роботи цього процесу в режимах пуску та зупинки можна досягти, автоматизувавши ці задачі. Тому для будь-якого технологічного процесу актуальна автоматизація задачі логічного керування.

1.3.2 Формалізація вимог до розв'язання задачі регулювання та вибір принципу побудови системи автоматичного регулювання.

1.3.2.1 Формалізація вимог до гранично-припустимих статичних і динамічних відхилень регульованих змінних від відповідних заданих значень перехідних і динамічно сталих процесів і подання їх у формі регламентних зон регульованих змінних.

Відповідно до нормативів ведення технологічних процесів (див. табл. 2.1) температура переохолодженого повітря $T_{гнв}$ має підтримуватися на рівні 20°C з точністю ± 0.5 , за цим параметром припустимі короткочасні відхилення до $\pm 1^{\circ}\text{C}$ протягом часу не більше 60 секунд. . Регламентна зона за цим параметром наведена на рис. 3.2.1. Температура гарячого сухого повітря $T_{гс}$ має підтримуватися на рівні 90°C з точністю ± 0.5 , за цим параметром припустимі короткочасні відхилення до $\pm 5^{\circ}\text{C}$ протягом часу не більше 60 секунд. Регламентна зона за цим параметром наведена на рис. 1.20.

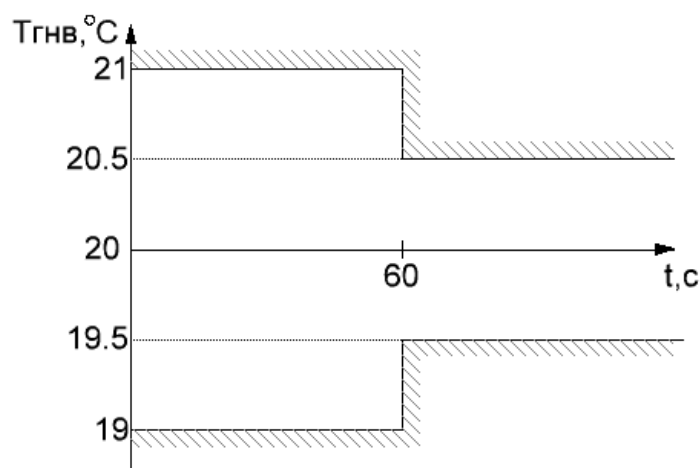


Рис. 1.20 – Регламентна зона для температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$

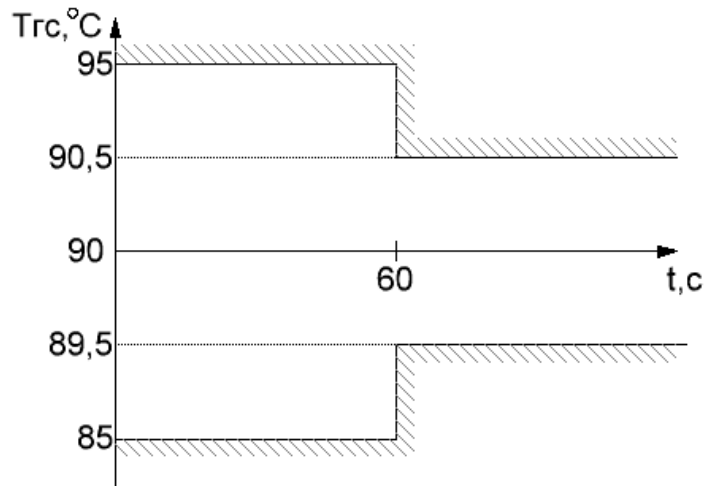


Рис. 1.21 – Регламентна зона для температури гарячого сухого повітря T_{gc}

1.3.2.2 Формалізація інтегральних вимог до перехідних та динамічно сталих процесів регулювання у формі інтегральних критеріїв оптимальності САР.

Як видно з регламентів на САР для процесу термічної обробки ковбаси особливо жорсткі вимоги пред'являються до тривалих відхилень, так як саме недотримання цих регламентів може призвести до браку готової продукції і суттєвих економічних збитків. При цьому малі відхилення регламентуються дуже жорстко. Тому в якості інтегрального критерію застосуємо саме інтегральний модульний критерій, що сильно штрафує незначні відхилення і мало штрафує короточасні відхилення. Тому ефективність роботи САР і підвищення її динамічної точності доцільно вести за такими критерієм:

$$J_2 = \int_0^{t_M} [|\Delta T_{гнв}(t)|] \cdot dt$$

$$J_2 = \int_0^{t_M} [|\Delta T_{гс}(t)|] \cdot dt$$

де t_M – час моделювання;

$\Delta T_{гнв}(t)$ – відхилення температури переохолодження повітря від заданого значення;

$\Delta T_{гс}(t)$ – відхилення температури догрітого повітря заданого значення;

1.4 Синтез і аналіз системи автоматичного регулювання базової структури

1.4.1 Конкретизація структури САР і алгоритмів регулювання.

1.4.1.1 Розробка на основі обраного загального принципу побудови САР, її базової конкретної структури.

Координатна схема процесу термічної обробки ковбаси наведена на рис. 1.5. Відповідно до неї та до структурної схеми, що відповідає замкненому принципу керування, структурна схема САР матиме вигляд, наведений на рис. 1.21.

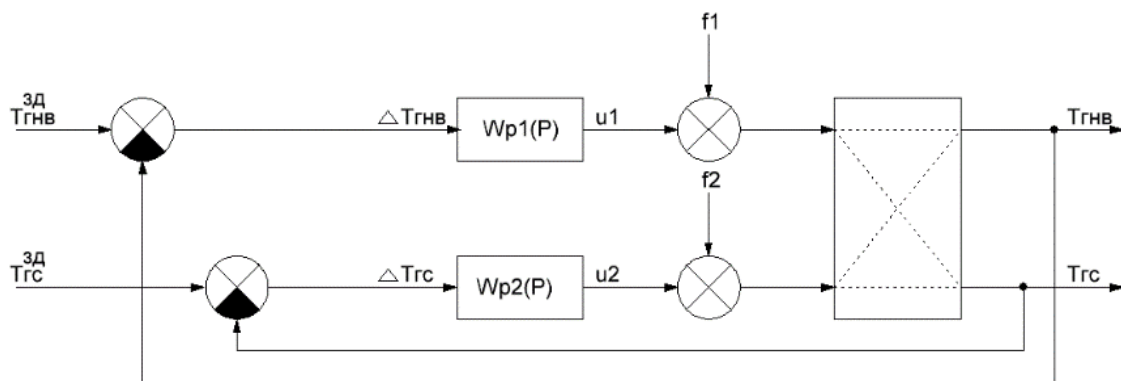


Рис. 1.21 – Структурна схема системи керування, що відповідає замкненому принципу керування

На рисунку представлено:

$T_{гнв}^{зд}$ - задане значення переохолодженого повітря

$\Delta T_{гнв}$ - помилка регулювання температури переохолодженого повітря

$T_{гнв}$ – температура переохолодженого повітря

$T_{гс}^{зд}$ - задане значення догрітого повітря

$\Delta T_{гс}$ - помилка регулювання температури догрітого повітря

$T_{гс}$ – температура догрітого повітря

U_1 – струм живлення термоелектричного охолоджувача

U_2 – струм живлення термоелектричного нагрівача

f_1 – вектор неконтрольованих збурень

f_2 - вектор неконтрольованих збурень

$Wp_1(P)$ – передатна функція температури переохолодження повітря

$Wp_2(P)$ – передатна функція температури догрівання повітря

1.4.1.2 Вибір альтернативних варіантів типових алгоритмів регулювання, запис їх рівнянь і передатних функцій.

Процес гарячого копчення ковбас з використанням термоелектричного теплового насосу за всіма каналами має статичні властивості, тому в якості альтернативних варіантів алгоритмів регулювання обираємо пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) алгоритм регулювання.

Рівняння руху ПІД-регулятора

$$u(t) = K_p \cdot \left(\Delta y(t) + \frac{1}{T_{ИЗ}} \int_0^t \Delta y(t) dt + T_{np} \frac{d\Delta y(t)}{dt} \right) + u_0;$$

Передаточна функція ПІД-регулятора

$$W_p(p) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{ИЗ}p} + \frac{T_{ИП}p}{0,2 \cdot T_{ИП}p + 1} \right)$$

1.4.1.3 Розробка структурної схеми цифрового імітаційного моделювання САР при детермінованих та стохастичних вхідних діях.

Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором наведена на рис. 1.22.

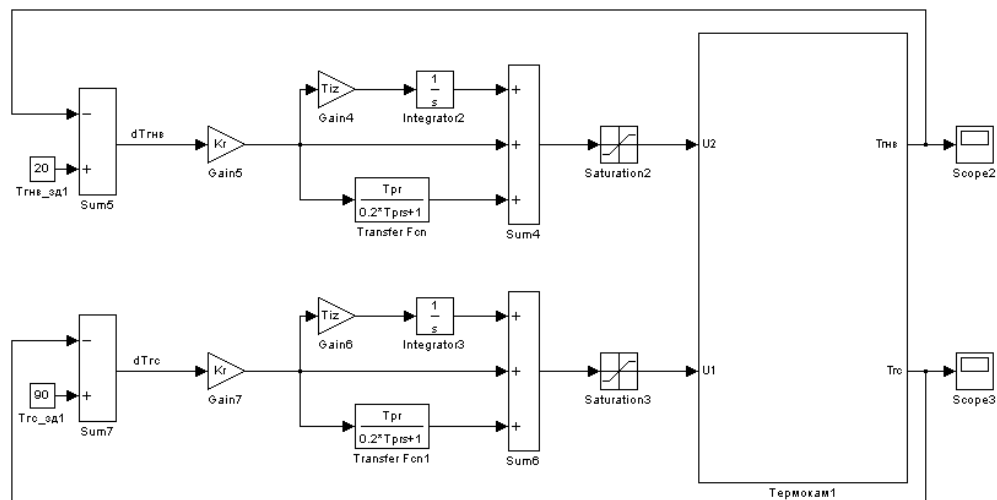


Рис. 1.22 – Структурна схема моделювання САР з ПІД-регулятором

1.4.2 Параметричний синтез САР з різними варіантами типових алгоритмів регулювання і їх порівняльний аналіз для детермінованих вхідних дій.

1.4.2.1 Вибір початкових наближень настоюваних параметрів алгоритмів

регулювання на основі інженерних методик параметричного (неоптимального) синтезу САР.

Для оптимального параметричного синтезу САР температури переохолодженого повітря (Тгнв) з ПІД-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання, наведену на рисунку 1.23. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора наведені на рисунку 1.26.

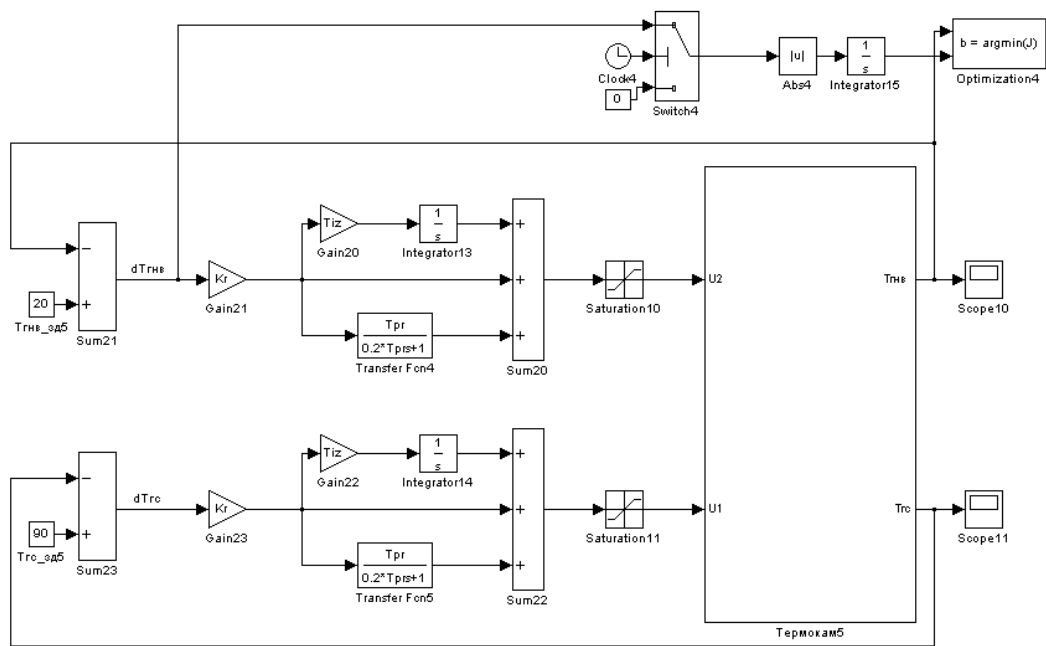


Рис. 1.23 - Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

Для оптимального параметричного синтезу САР температури догрітого повітря (Тгс) з ПІД-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання, наведену на рисунку 1.24. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора наведені на рисунку 1.27.

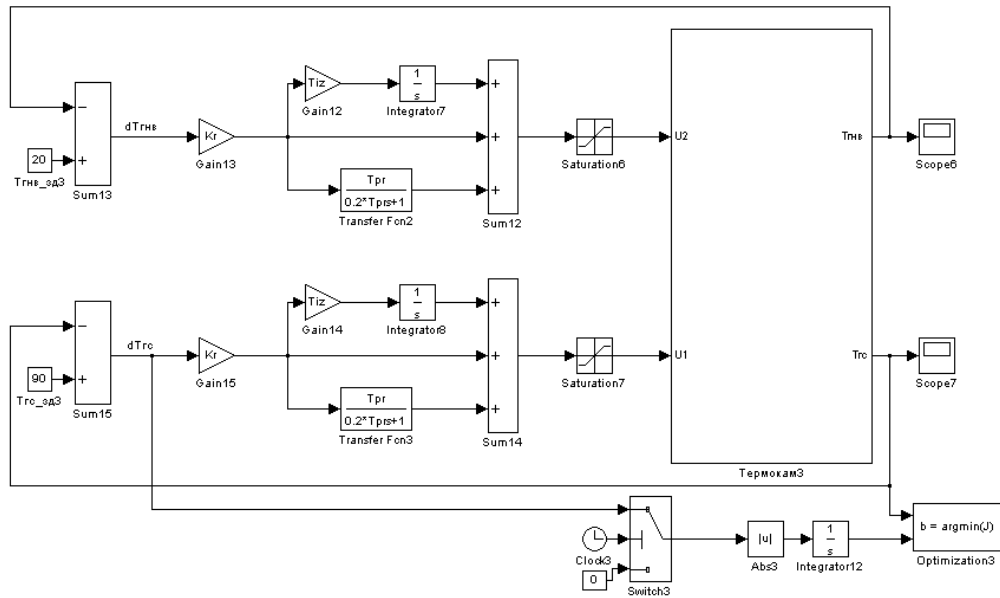


Рис. 1.24 - Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора

На рисунку 1.25 представлена схема моделювання САР температури T_{gc} та температури T_{gnb} з ПІД регуляторами до та після оптимізації налаштувань регуляторів.

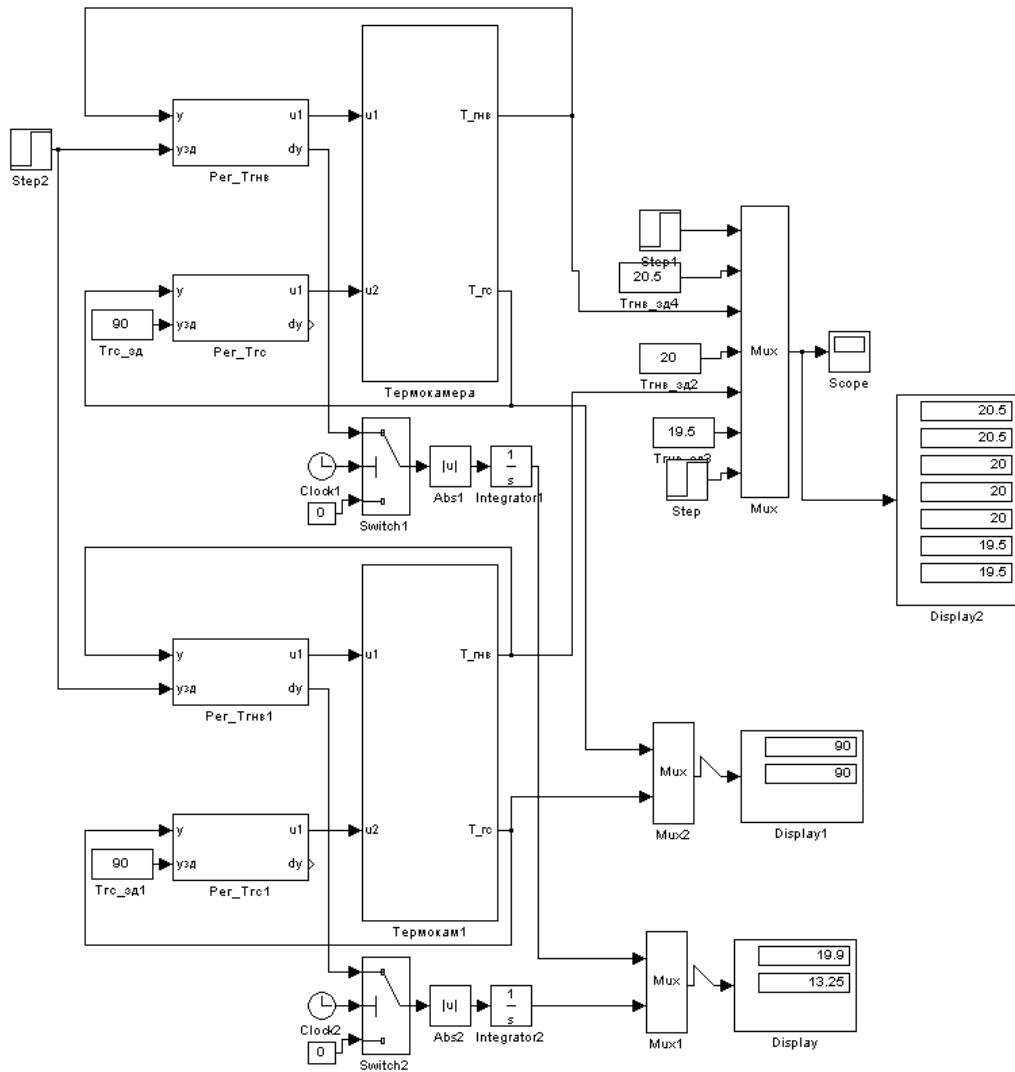


Рис. 1.25 – схема моделювання порівняння САР базової структури з ПІД-регуляторами до та після оптимізації

На рисунку 1.24 представлено результати моделювання САР температури $T_{гнв}$ з ПІД регулятором до та після оптимізації налаштувань регулятора.

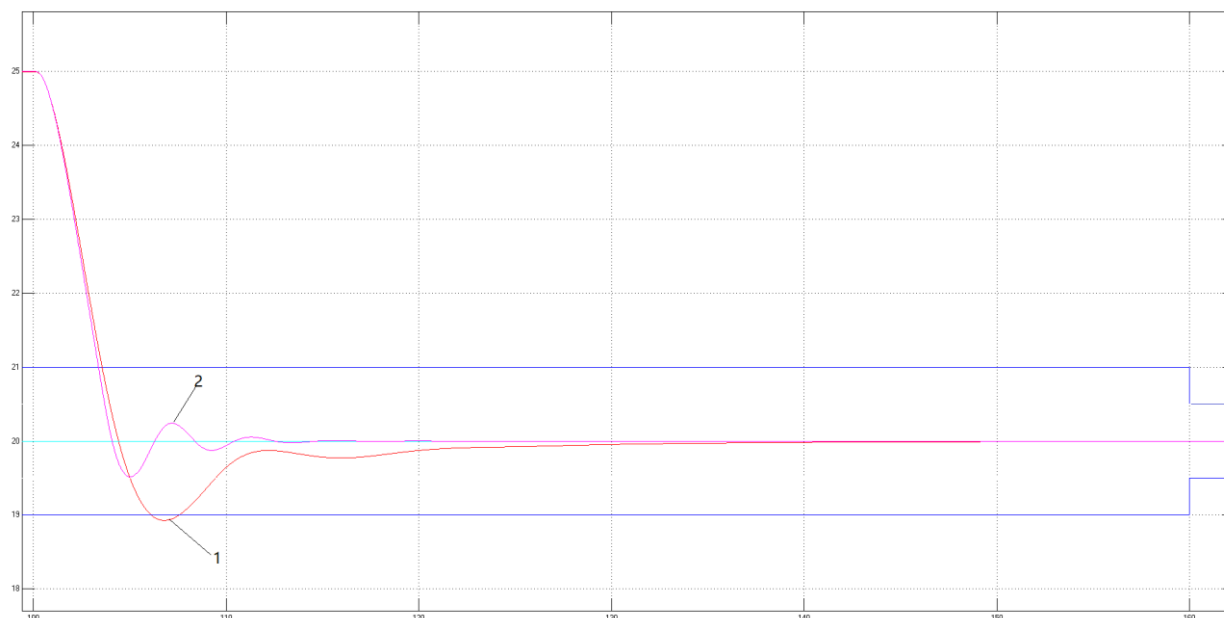


Рис. 1.26 – Порівняльний аналіз САР температури $T_{гнв}$ з ПІД-регулятором

На рисунку 1.27 представлено результати моделювання САР температури $T_{гс}$ з ПІД регулятором до та після оптимізації налаштувань регулятора.

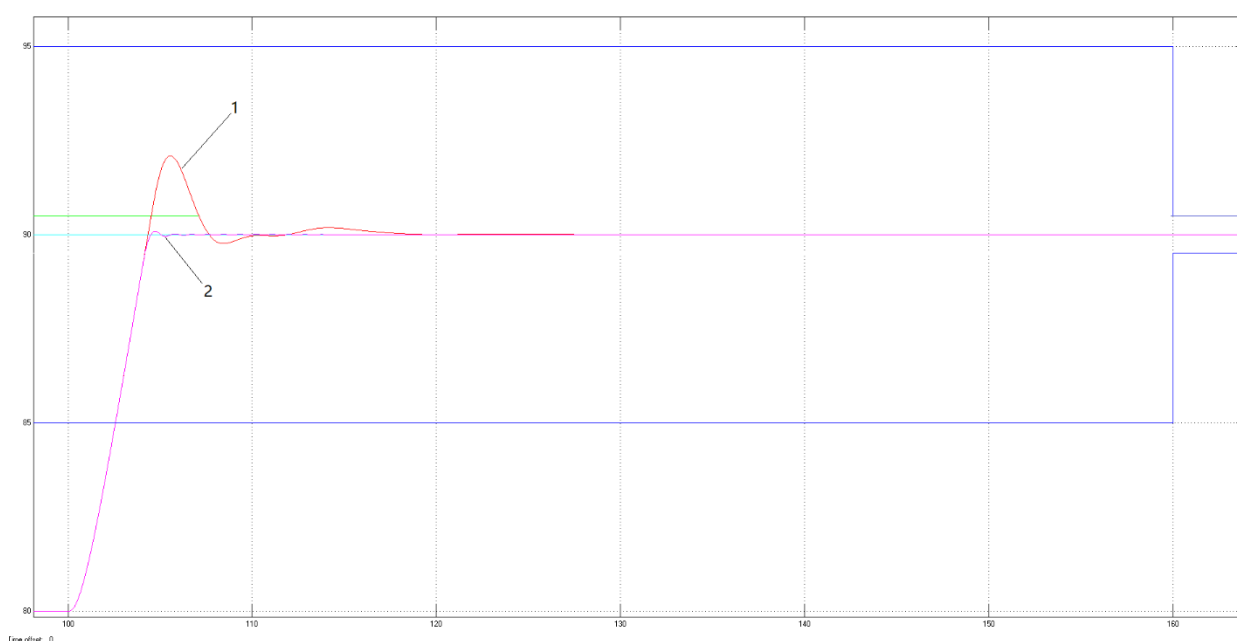


Рисунок 1.27 – Порівняльний аналіз САР температури $T_{гс}$ з ПІД-регулятором

Порівняння САР температури сировини на виході з нагрівача з ПІД-регулятором $T_{гнв}$ до та після налаштувань регулятора за прямими та інтегральними показниками якості наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – порівняння показників якості САР з ПІД – регулятором до та

після оптимізації за каналом u1 - Тгнв.

Система	Показники якості				
	Інтегральні		Прямі		
	$ I $	I^2	dy_max	T _{per}	dy_ct
до	816,38	2324,36	6,2	83	0
після	587,07	1104,78	4,5	23	0

Порівняння САР температури сировини на виході з реактора з ПІД-регулятором Т_{гс} до та після налаштувань регулятора за прямими та інтегральними показниками якості наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – порівняння показників якості САР з ПІД – регулятором до та після оптимізації за каналом u2 - Тгс.

Система	Показники якості				
	Інтегральні		Прямі		
	$ I $	I^2	dy_max	T _{per}	dy_ct
До	34768,76	692346,4	27,9	1656	0
після	14339,09	158865,2	16,6	908	0

1.5 Висновки за розділом.

При розробці АСК процесу камерою варки та гарячого копчення ковбас потоці з використанням термоелектричного теплового насосу на базі мікропроцесорної техніки, головним завданням якої буде досконалий контроль та керування процесом, потрібно підтримувати температуру переохолодження повітря Тгнв та догрівання повітря Тгс. Для цього необхідно буде обрати сучасні засоби керування, розробити САР з високою якістю регулювання, а також скласти досконали алгоритми керування.

У середовищі імітаційного моделювання MATLAB здійснювалася розробка моделі як об'єкта керування. Були отриманні перехід та квазістатичні характеристики моделей та обґрунтована їх адекватність об'єкту. Також проведено ідентифікацію математичних моделей динаміки каналів ОК. Усі

канали ОК мають статичні властивості. Параметричну ідентифікацію проведено за методиками двох загальних точок для 1-го та 2-го порядку.

Сформульовано гранично-припустимі вимоги до якості регулювання температури $T_{гнв}$ та температури $T_{гс}$.

Синтез САР проведено в два етапи. На першому етапі розрахунок налаштувань регулятора проводився за інженерними методиками Копеловича, а на другому етапі було застосовано оптимальний параметричний синтез. В якості критерію використано інтегральний модульний критерій. В якості базового алгоритму регулювання будемо використовувати ПД-алгоритм.

РОЗДІЛ 2. СИНТЕЗ І АНАЛІЗ САР ПІДВИЩЕНОЇ ДИНАМІЧНОЇ ТОЧНОСТІ

2.1 Структурний синтез САР підвищеної динамічної точності.

2.1.1 Аналіз особливостей об'єкта регулювання, що знижують динамічну точність і вибір способів її підвищення за рахунок введення в структуру САР додаткових зв'язків.

Причиною недостатньої точності САР можуть бути зовнішні умови: дія інтенсивних контрольованих і неконтрольованих збурень, інтенсивне зміна завдання САР, а також внутрішні особливості ОК і САР (значне співвідношення τ_o / T_o , взаємний вплив каналів в багатовимірної САР).

У нашому випадку основною причиною недостатньої динамічної точності САР є взаємна дія перехресного зв'язку температур $T_{гнв}$ та $T_{гс}$. Основним шляхом підвищення динамічної точності в даному випадку є побудова автономної САР.

2.1.2 Розробка на основі вибраних способів підвищення динамічної точності САР її структурної схеми і формулювання (в аналітичній формі) умов, що забезпечують необхідні властивості САР.

В основу підвищення динамічної точності САР буде покладено принцип інваріантності Петрова, сутність якого у введенні додаткових каналів впливу через коригувальний зв'язок. Відповідно до принципу інваріантності Петрова структурна схема автономної САР матиме вигляд, наведений на рис. 2.1.

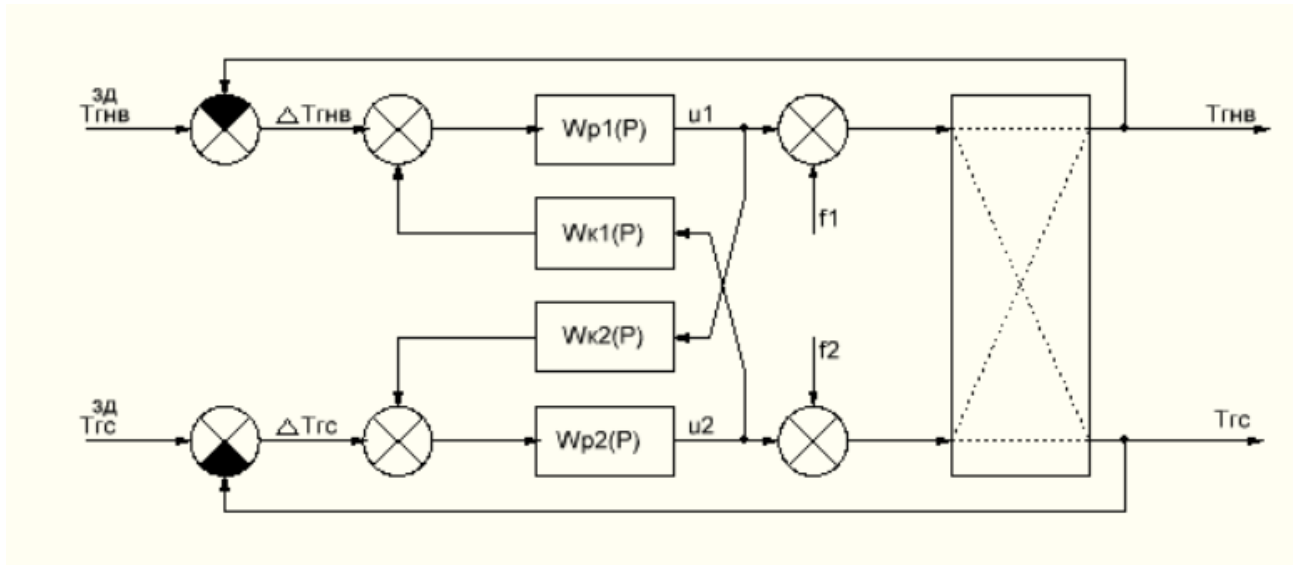


Рис. 2.1 – Структурна схема двомірної автономної САР, з міжрегуляторним коригуючим зв'язком

Позначення на рисунку 2.1:

$T_{\text{ГНВ}}^{\text{зд}}$ - задане значення переохолодженого повітря

$\Delta T_{\text{ГНВ}}$ - помилка регулювання температури переохолодженого повітря

$T_{\text{ГНВ}}$ – температура переохолодженого повітря

$T_{\text{Гс}}^{\text{зд}}$ - задане значення догрітого повітря

$\Delta T_{\text{Гс}}$ - помилка регулювання температури догрітого повітря

$T_{\text{Гс}}$ – температура догрітого повітря

U_1 – струм живлення термоелектричного охолоджувача

U_2 – струм живлення термоелектричного нагрівача

f_1 – вектор неконтрольованих збурень

f_2 - вектор неконтрольованих збурень

$W_{p1}(P)$ – передатна функція температури переохолодження повітря

$W_{p2}(P)$ – передатна функція температури догрівання повітря

$W_{k1}(P)$ - передаточна функція коригуючого зв'язку температури $T_{\text{ГНВ}}$

$W_{k2}(P)$ - передаточна функція коригуючого зв'язку температури $T_{\text{Гс}}$

Необхідною умовою реалізації САР є фізична можливість організації додаткового каналу впливу. Достатньою умовою реалізації САР є фізична реалізація передаточної функції коригуючого зв'язку.

2.1.3 Виведення передатної функції коригуючого зв'язку, аналіз його

структури з умов фізичної реалізованості, приведення до фізично реалізуемого виду, представлення у формі з'єднання типових динамічних ланок та отримання перехідних характеристик.

Знайдемо передаточну функцію коригуючого зв'язку $W_{K1}(p)$ та $W_2(p)$, що забезпечують автономність контурів регулювання температури $T_{Гс}$ відносно контуру регулювання температури $T_{ГНВ}$ відповідно та навпаки. В якості вхідних параметрів системи регулювання приймемо керуючі дії u_1 та u_2 . Запишемо рівняння, які будуть відповідати умові автономності:

$$y_1 = W_{u_1 T_{Гс}}^c(p) \cdot u_1|_{u_1 \neq 0} = 0$$

$$y_2 = W_{u_2 T_{ГНВ}}^c(p) \cdot u_2|_{u_2 \neq 0} = 0$$

Якщо:

$$W_o^{T_{ГНВ}}(p) = \frac{1.16 * e^{-16.5p}}{78.75p + 1}$$

$$W_K^{T_{ГНВ}}(p) = \frac{-0.04 * e^{-67.3p}}{67.25p + 1};$$

$$W_{u_1 T_{ГНВ}}^p(p) = 3.86 \cdot \left(1 + \frac{1}{127.6p} + 8.54p\right).$$

Тоді:

$$\begin{aligned} W_{u_1 T_{Гс}}^K(p) &= - \frac{W_K^{T_{ГНВ}}(p)}{W_o^{T_{ГНВ}}(p) \cdot W_{u_1 T_{ГНВ}}^p(p)} = \\ &= - \frac{\frac{-0.04 * e^{-67.3p}}{67.25p + 1}}{3.86 \cdot \left(1 + \frac{1}{127.6p} + 8.54p\right) \cdot \frac{1.16 * e^{-16.5p}}{78.75p + 1}} = \\ &= 0.008 \cdot e^{-50.8p} \cdot \frac{127.6p \cdot (78.75p + 1)}{(61.25p + 1) \cdot (1089p^2 + 127.6p + 1)} \end{aligned}$$

Якщо:

$$W_o^{T_{Гс}}(p) = \frac{0.07 * e^{-4.2p}}{22.7p + 1}$$

$$W_k^{T_{rc}}(p) = \frac{0,04 * e^{-13.5p}}{14,25p + 1}$$

$$W_{u_2 T_{rc}}^p(p) = 1,6 \cdot \left(1 + \frac{1}{26,99p} + 300p\right)$$

Тоді:

$$W_{u_2 T_{гнв}}^K(p) = - \frac{W_k^{T_{rc}}(p)}{W_o^{T_{rc}}(p) \cdot W_{u_{12} T_{rc}}^p(p)} =$$

$$= - \frac{\frac{0,04 * e^{-13.5p}}{14,25p + 1}}{1,6 \cdot \left(1 + \frac{1}{26,99p} + 300p\right) \cdot \frac{0,07 * e^{-4.2p}}{22.7p + 1}} =$$

$$= -0,357 \cdot e^{-9,3p} \cdot \frac{27p \cdot (22,175p + 1)}{(14,25p + 1) \cdot (8100p^2 + 27p + 1)}$$

Отримані передаточні функції коригуючих зв'язків є фізично реалізуємими, оскільки містять ланки чистого запізнення.

Структурна схема моделювання передатної функції коригуючого зв'язку $W_{u_1 T_{rc}}^K(p)$ приведена на рис. 2.2, а її перехідна характеристика - на рис. 2.3.



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

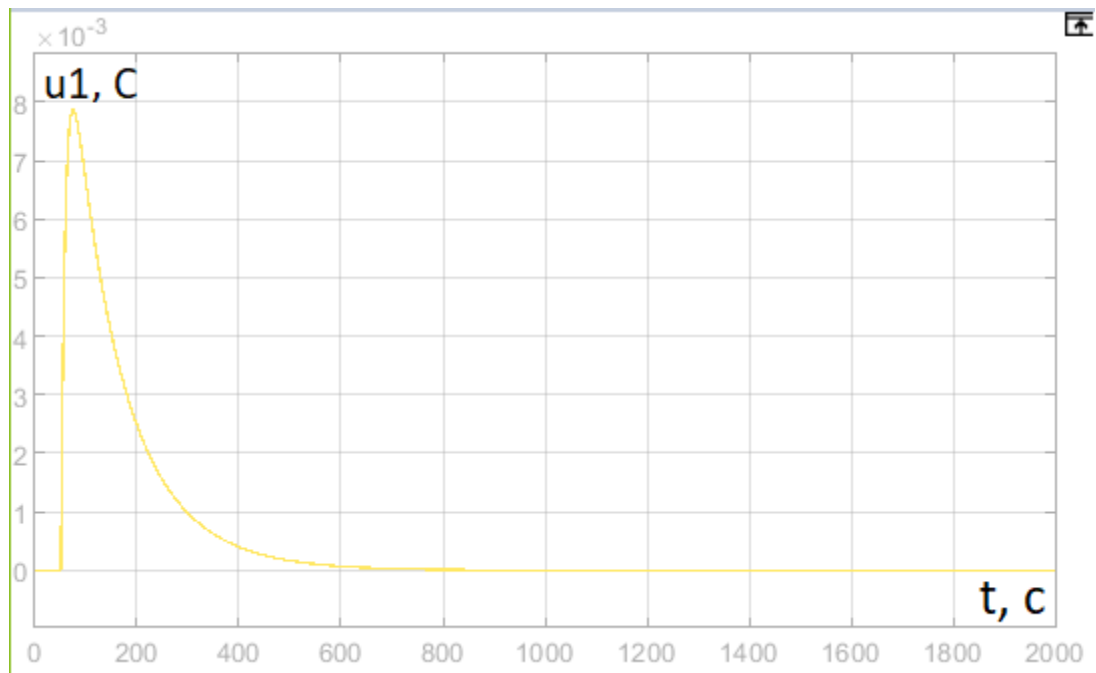


Рис. 2.3 – Перехідна характеристика коригуючого зв'язку

Структурна схема моделювання передатної функції коригуючого зв'язку $W_{u_2 T_{ГНВ}}^K(p)$ приведена на рис. 2.4, а її перехідна характеристика - на рис. 2.5.

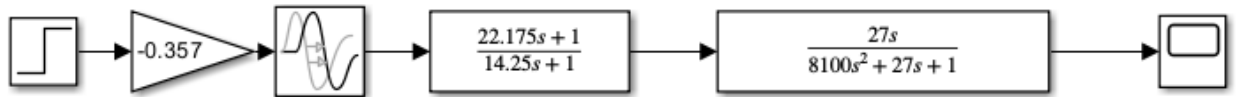


Рис. 2.4 – Структурна схема моделювання передатної функції коригуючого зв'язку

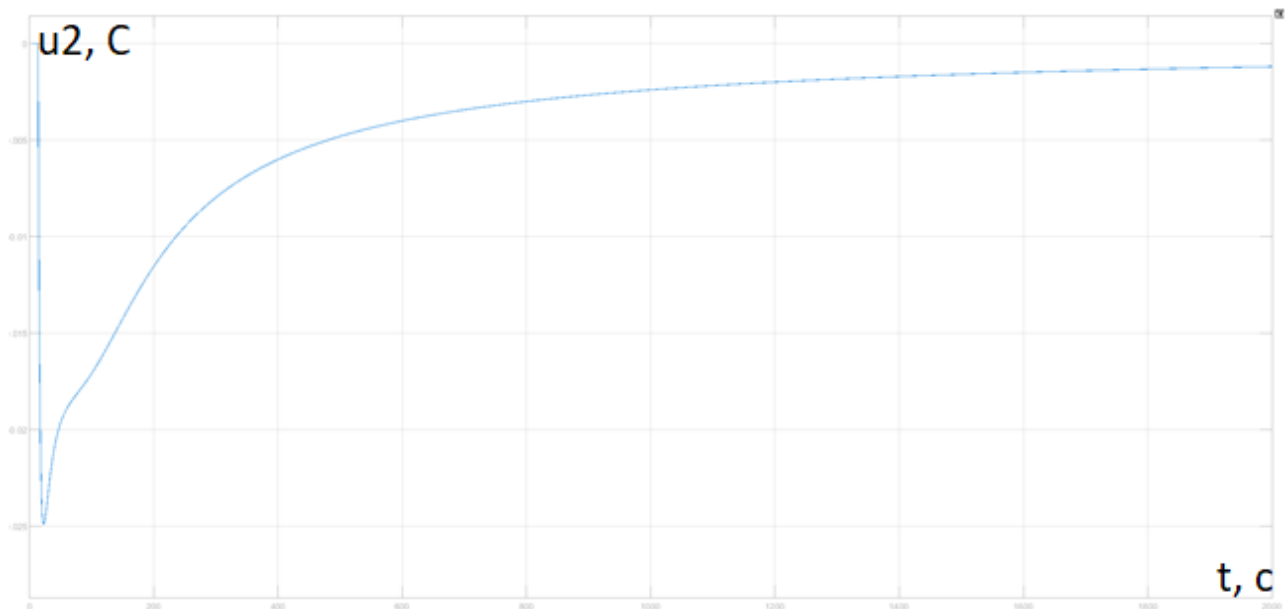


Рис. 2.5 – Перехідна характеристика коригуючого зв'язку

2.2 Спрощення коригуючих зв'язків з урахуванням особливостей їх технічної реалізації і параметричний синтез САР при детермінованих вхідних діях.

2.2.1 Аналіз складності технічної реалізації коригувальних зв'язків проводиться з урахуванням доцільності такої реалізації та можливостей технічних засобів. За результатами такого аналізу роблять висновок про спрощення ПФКЗ за рахунок зниження їх розмірності, апроксимації запізнення дрібно-раціональними передаточними функціями і т.п. зі збереженням загальних властивостей зв'язків.

Отримана передаточна функція коригуючого зв'язку представлена дуже складною функцією, тому її треба спростити, при цьому зберегти її диференціюючі властивості. Спрощені передатні функції коригуючих зв'язків будуть мати такий вигляд:

$$W_{u_1 T_{Гс}}^K(p) = K_{K1} \cdot e^{-T_{K1}p} \cdot \frac{T_{K12}p}{(T_{K12}p + 1)^2}$$

$$W_{u_2 T_{ГНВ}}^K(p) = K_{K2} \cdot e^{-T_{K2}p} \cdot \frac{T_{K22}p}{(T_{K22}p + 1)^2} \quad (2.3)$$

2.2.2 Вибір початкових наближень параметрів спрощених коригуючих зв'язків, який здійснюється з умов близькості перехідних характеристик коригуючих зв'язків до і після їх спрощення, де можливо застосувати будь-який метод як оптимізаційного, так і звичайного.

Як початкові наближення параметрів коригуючого зв'язку $W_{u_1 T_{гс}}^k(p)$ використаємо наступні значення параметрів: $K_{к1} = 0,15$; $T_{к1} = 58$; $T_{к12} = 38,6$. Для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку скористаємося схемою моделювання, які наведені на рис. 2.4. Результати розрахунку початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку наведені на рис. 2.5.

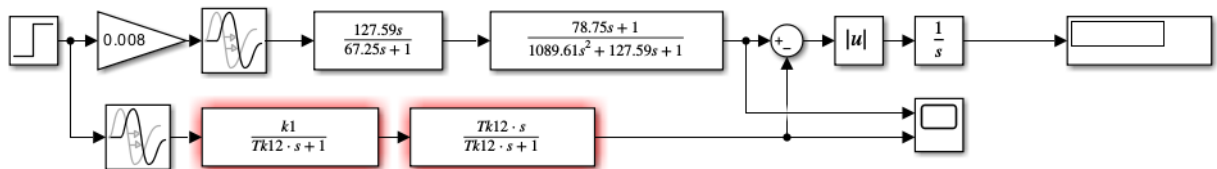


Рис. 2.4 – Схема моделювання для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку



Рис. 2.5 – Перехідна характеристика розрахункового та спрощеного коригуючого зв'язку

Як початкові наближення параметрів коригуючого зв'язку $W_{u_2 T_{гнв}}^k(p)$

використаєм наступні значення параметрів: ; $K_{K2} = -0,357$; $T_{K2} = 9,3$; $T_{K22} = 20,52$.

Для уточнення початкових наближень параметрів коригу

ючого зв'язку скористаємося схемою моделювання, які наведені на рис.

2.6. Результати розрахунку початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку наведені на рис. 2.7.

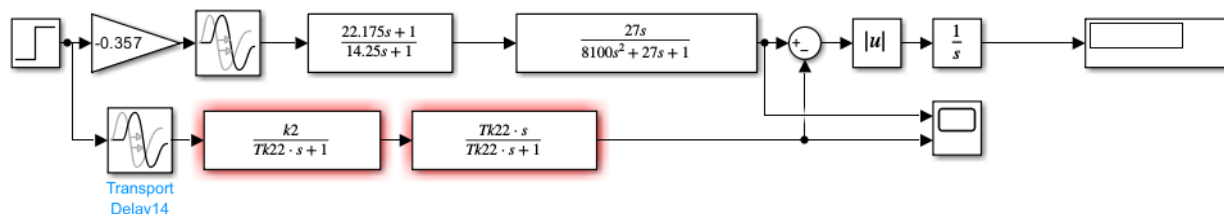


Рис. 2.6 – Схема моделювання для уточнення початкових наближень параметрів коригуючого зв'язку

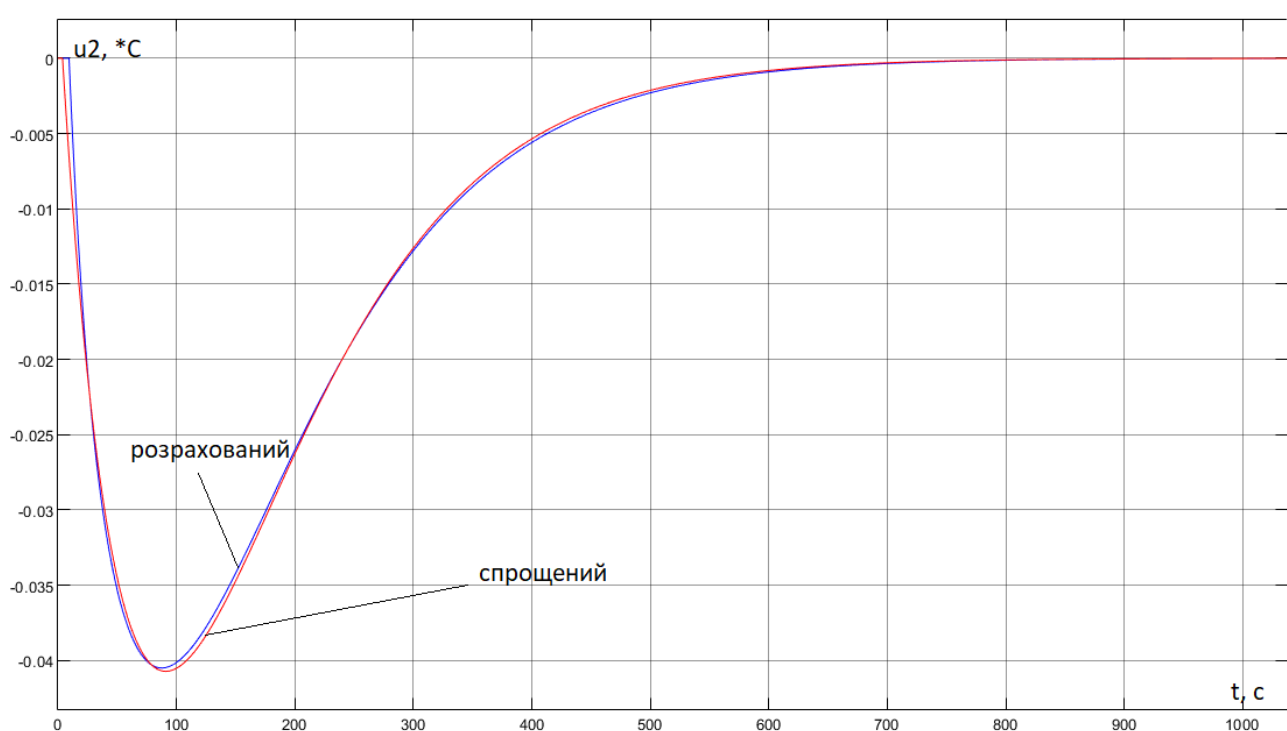


Рис. 2.7 – Перехідна характеристика розрахункового та спрощеного коригуючого зв'язку

2.2.3 Розробка структурної схеми цифрового імітаційного моделювання і параметричний оптимальний синтез САР підвищеної динамічної точності для детермінованих (ступінчастих) вхідних дій.

Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку наведена на рис. 2.8,

а результати оптимізації - на рис. 2.9.

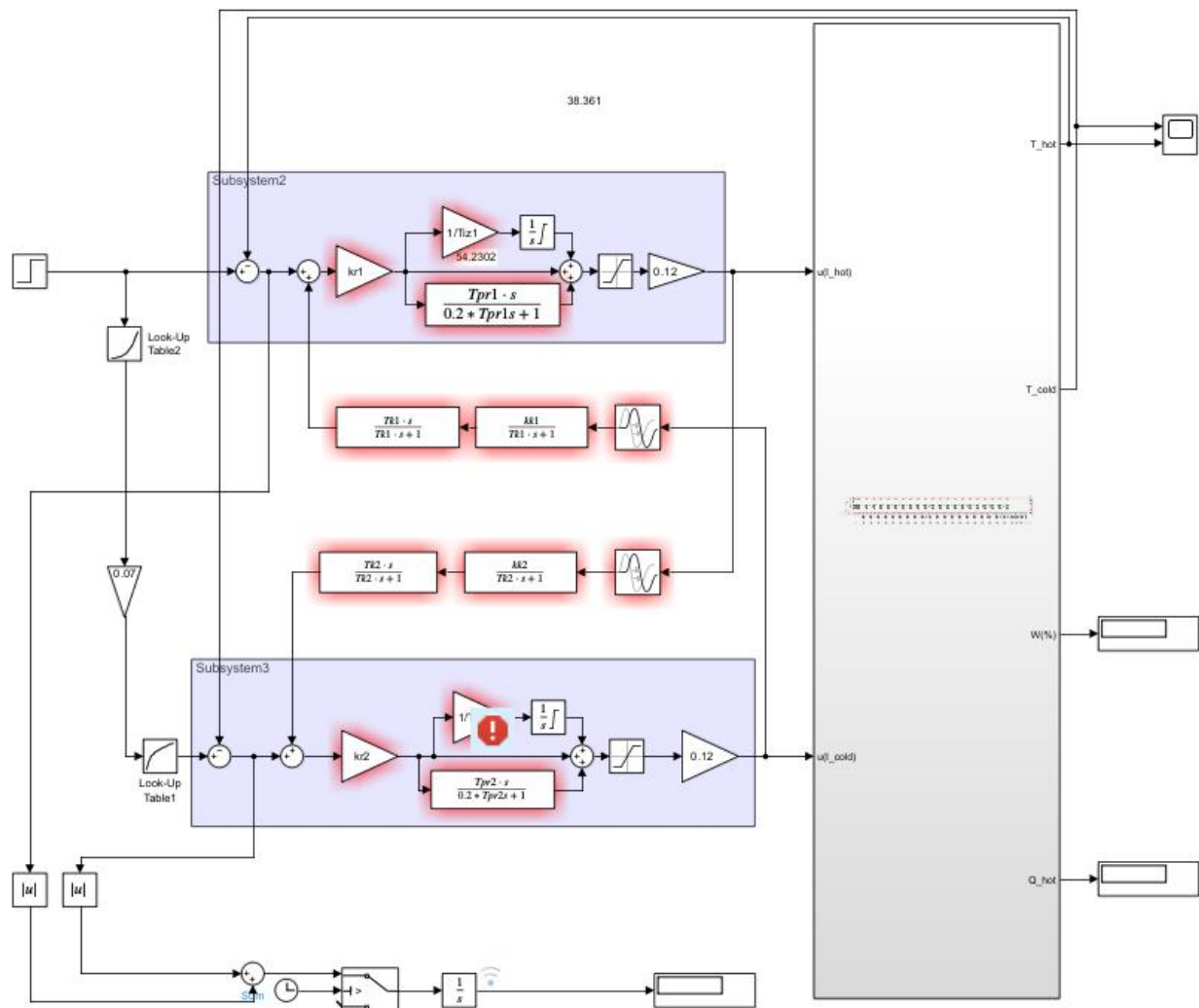


Рис. 2.8 – Схема моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку

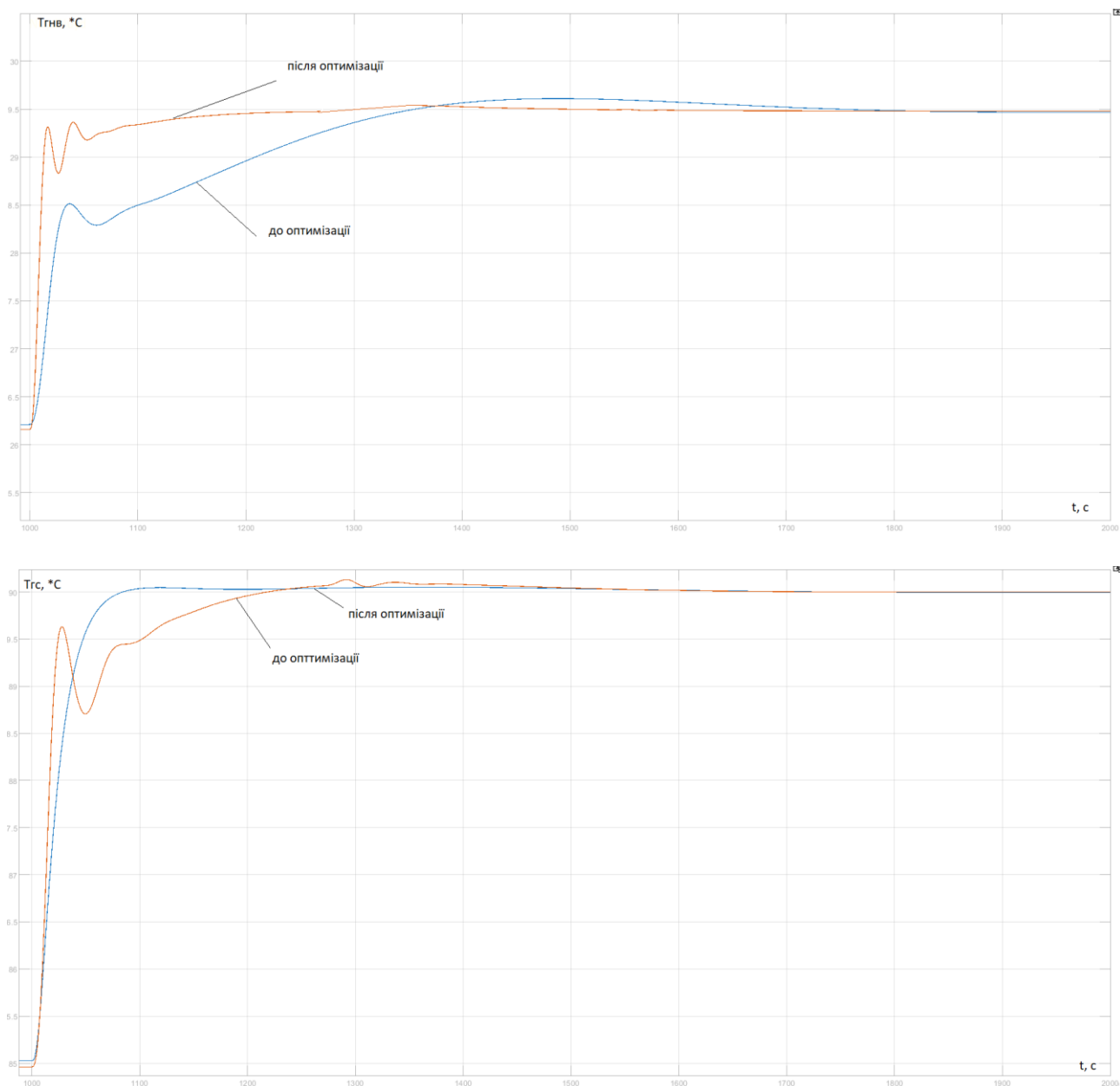


Рис. 2.9 - результати оптимізації САК ПДТ

Назва змінної	Оптимальне значення	Нижнє обмеження	Початкове наближене	Верхнє обмеження	Значення критерію оптимальності: до – 278.33 після – 151.24 оптимізації.
K1	2.4	0	0.15	5	
T1	2.72	0	38.6	100	
T12	29.5	0	58	200	Кількість кроків процедури оптимізації: максимальне – 1000 фактичне - 156
K2	0.46	-5	-0.357	5	
T2	264.6	0	9.3	100	
T22	87.29	0	20.52	200	

2.3 Висновки за розділом.

Основним шляхом підвищення динамічної точності в даному випадку обрано побудову автономної САР.

В основу підвищення динамічної точності САР було покладено принцип інваріантності Петрова, сутність якого у введенні додаткових каналів впливу через коригувальний зв'язок.

Було виведено передатну функцію коригуючого зв'язку, приведено її до фізично реалізуємого виду та представлено у виді типових динамічних ланок. Оскільки передатна функція містить ланку чистого запізнення вона є фізично реалізуємою.

Після спрощення коригуючого зв'язку вибрано початкові наближення його параметрів з їх подальшою оптимізацією. Розроблено схему моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку.

Було проведено порівняльний аналіз САР базової структури та САР ПДТ. Суттєве зменшення інтегральних показників якості, максимального динамічного відхилення та часу регулювання свідчить про те що САР ПДТ є більш якісною в порівнянні з САР базової структури.

РОЗДІЛ 3. УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ, ЩО РЕАЛІЗУЮТЬ ФУНКЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ САК ТП, НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ІШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

3.1 Обґрунтування актуальності застосування систем управління, побудованих на базі апарата нечіткої логіки для розглянутого об'єкта керування.

Для того, щоб обґрунтувати актуальність застосування відповідної системи управління, необхідно визначити, до якої області вона відноситься згідно з рисунком 3.1. На рисунку 3.1 показані області ефективного застосування традиційних, нейромережевих і нечітких систем управління.

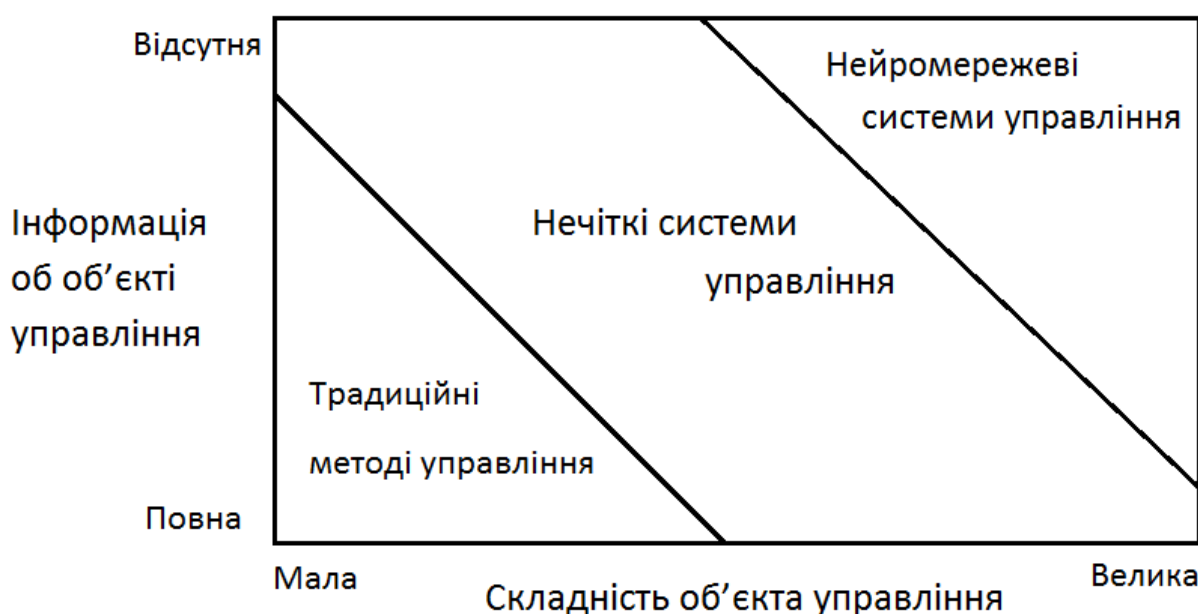


Рисунок 3.1 – Область ефективного застосування різних систем управління

Таким чином, для визначення актуальності застосування нечіткої системи керування необхідно указати невизначеність параметрів об'єкта управління, нелінійність статичної характеристики у деякому режимі функціонування системи.

Особливою проблемою в сфері автоматизації є управління об'єктами, функції яких описуються нелінійними залежностями. При проектуванні систем керування 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»).

Нечітке управління ефективно в умовах невизначеності інформації про динамічну поведінку складних об'єктів управління. Доцільність використання нечіткого підходу для побудови грубих регуляторів впливає з розгляду особливостей нечіткого управління. Основна перевага нечіткого підходу – можливість формування числа правил управління залежно від комбінації значень вхідних змінних регулятора і, отже, від зміни режиму роботи, рівня збурювань.

Для технічних систем з випадковим характером впливу, що збурює, складністю розробки динамічної моделі, її високим порядком, та 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.

Таким чином, в умовах наявності істотних невизначеностей у статичних і динамічних характеристиках рекуператора тепла повітря/повітря як об'єкта керування представляються труднощі в формалізації завдань синтезу регуляторів системи керування. 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 настроювання системи автоматичного регулювання.

3.2. Реалізація в програмному середовищі MATLAB\Simulink моделей каналів регулювання розглянутого об'єкта керування що характеризується нелінійними статичними характеристиками.

Для представлення статичної характеристики моделі об'єкта управління необхідно на вхід відповідного каналу регулювання подавати повільно наростаючу керуючу дію, а інші регульовані змінні підтримувати на номінальному рівні. Повільно наростаючий сигнал необхідно реалізувати за

допомогою включення блоку Ramp у відповідну модель каналу регулювання, а для підтримання регульованих змінних інших каналів використаємо ПІД-регулятори. Структурна схема повної моделі ОК з додатковим блоком Ramp представлена на рис. 3.2.

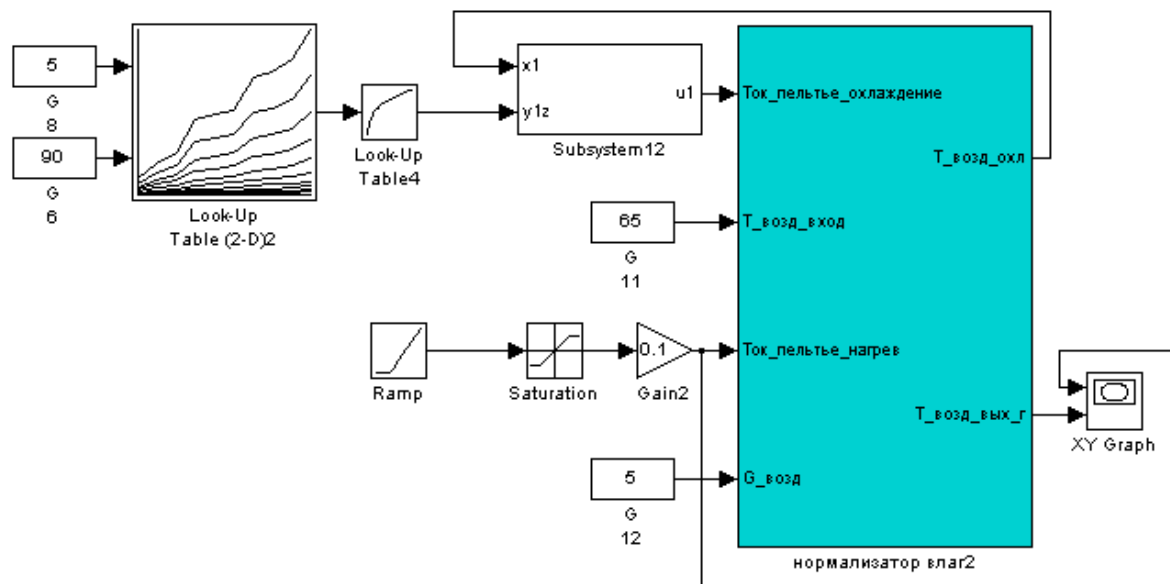


Рис. 3.2 – схема моделювання для отримання квазістатичних характеристик, реалізована в середовищі MATLAB\Simulink

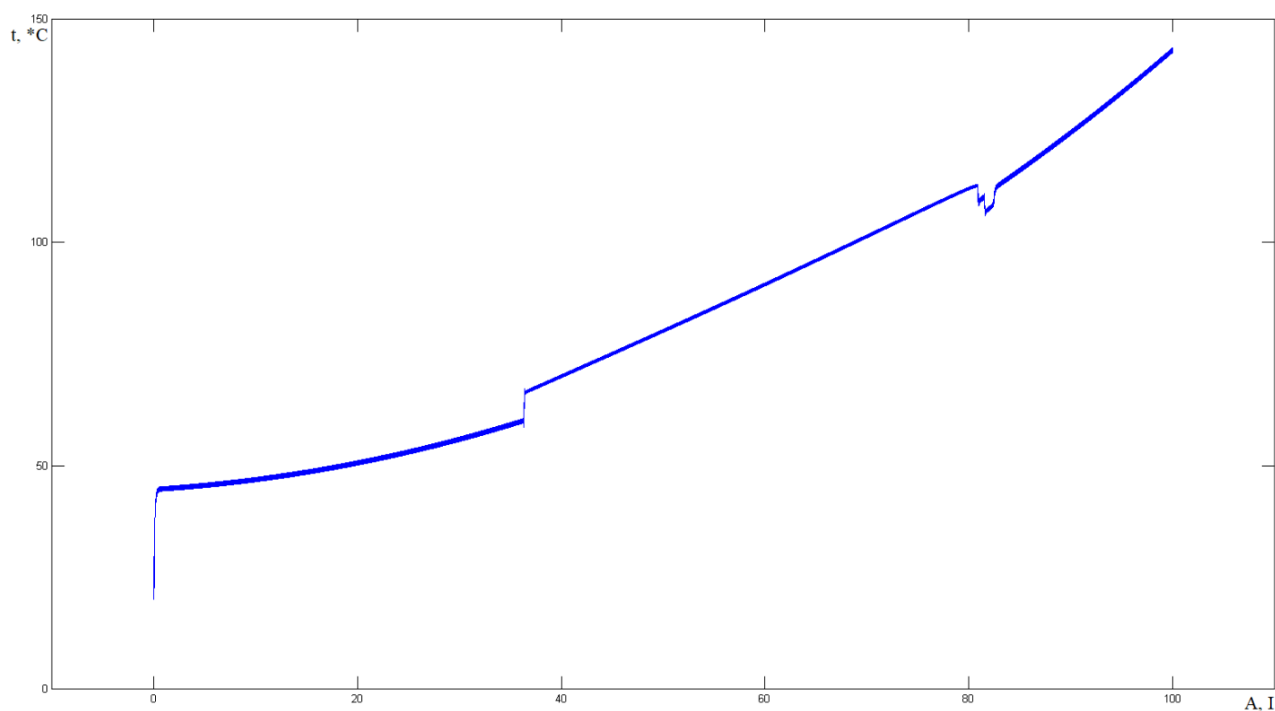


Рис. 3.3 – квазістатичні залежності температури повітря на виході рекуператора від струму живлення ТЕП при температурі повітря на вході рекуператора 35°C.

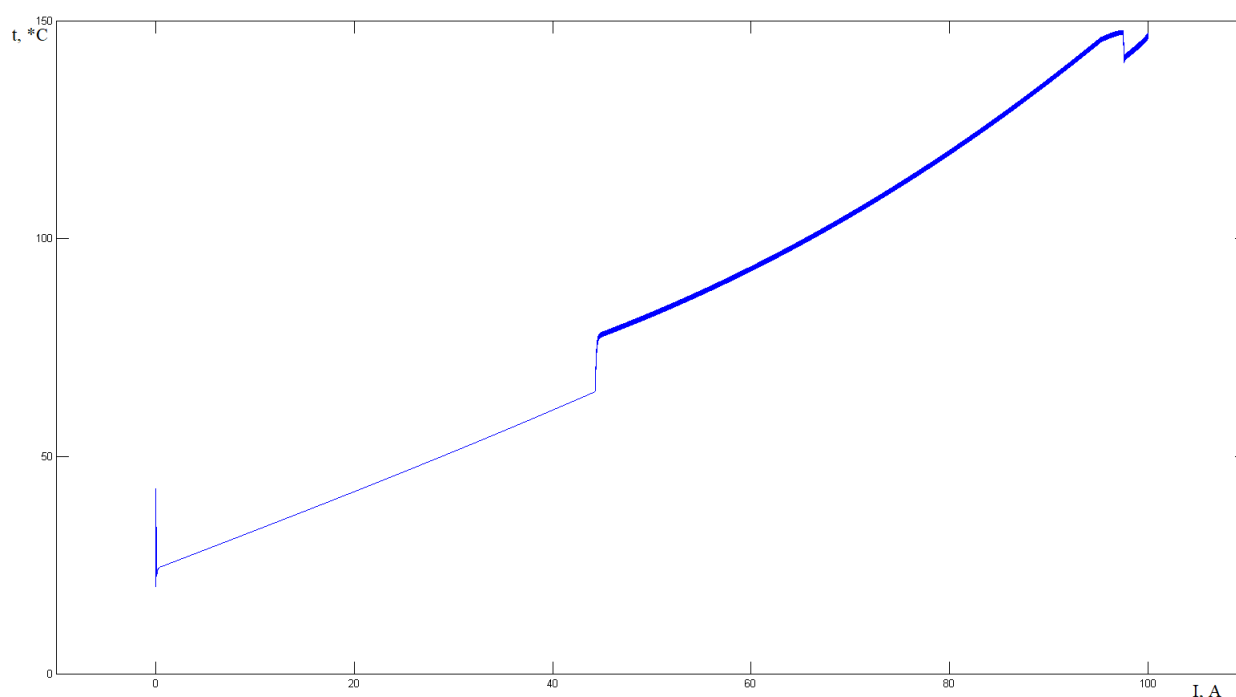


Рис. 3.4 – квазістатичні залежності температури повітря на виході рекуператора від струму живлення ТЕП при температурі повітря на вході рекуператора 50°C.

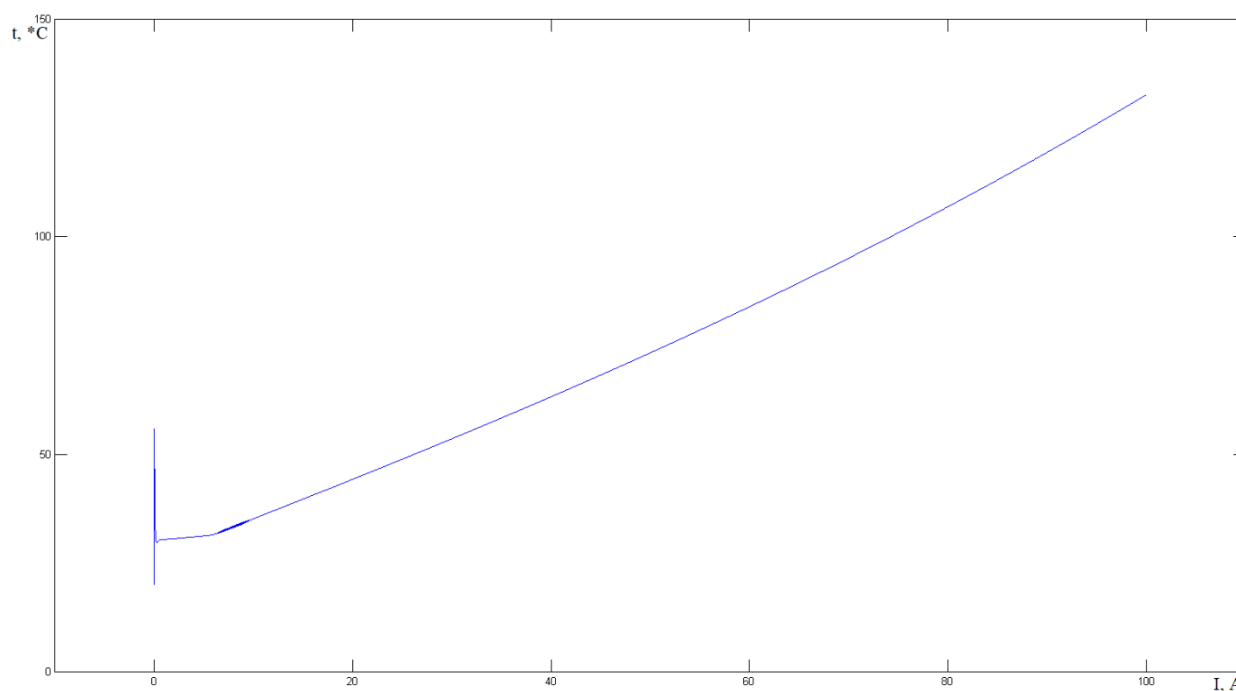


Рис. 3.5 – квазістатичні залежності температури повітря на виході рекуператора від струму живлення ТЕП при температурі повітря на вході рекуператора 65°C.

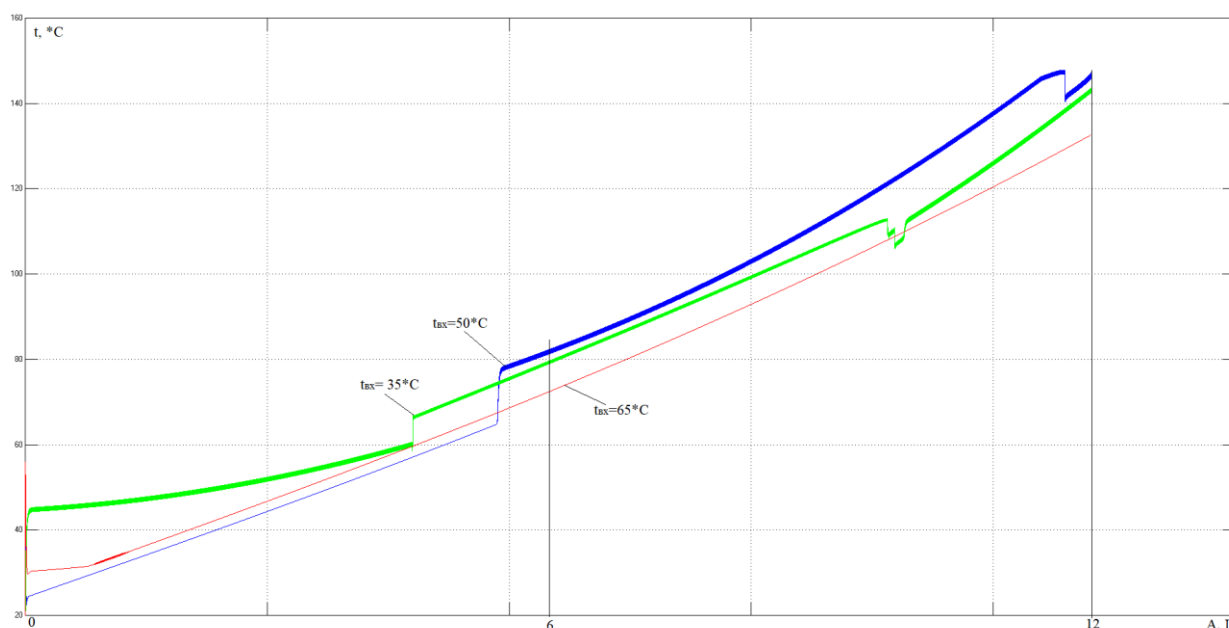


Рис. 3.6 – сімейство квазістатичних характеристик залежності температури повітря на виході рекуператора в від струму живлення ТЕП при температурі на вході рекуператора 35°C, 50°C та 65°C.

3.3. Параметричний синтез САУ з традиційним (П, ПІ, ПІД) регулятором для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.

Розрахунок параметрів ПІД- регулятора:

$$K_p = \frac{0,8 \cdot T_o}{K_o \cdot \tau_o} = \frac{0,8 \cdot 21,9}{0,65 \cdot 0,27} = 98,8 \frac{\%x.p.o.}{^{\circ}C}$$

$$T_{ИЗ} = 2,4 \cdot \tau_o = 2,4 \cdot 0,27 = 0,65c$$

$$T_{ИР} = 0,75 \cdot \tau_o = 0,75 \cdot 0,27 = 0,02c$$

В якості інтегрального критерію застосуємо саме інтегральний модульний критерій, що сильно штрафує незначні відхилення і мало штрафує короточасні відхилення. Тому ефективність роботи САР і підвищення її динамічної точності доцільно вести за такими критерієм:

$$J_2 = \int_0^{t_M} [|\Delta T_{гс}(t)|] \cdot dt \quad (3.1)$$

де t_M – час моделювання;

$\Delta T_{гс}(t)$ – відхилення температури догрітого повітря заданого значення.

Для оптимального параметричного синтезу САР температури догрітого повітря ($T_{гс}$) з ПІД-регулятором будемо використовувати структурну схему моделювання, наведену на рисунку 3.7. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора наведені на рисунку 3.8.

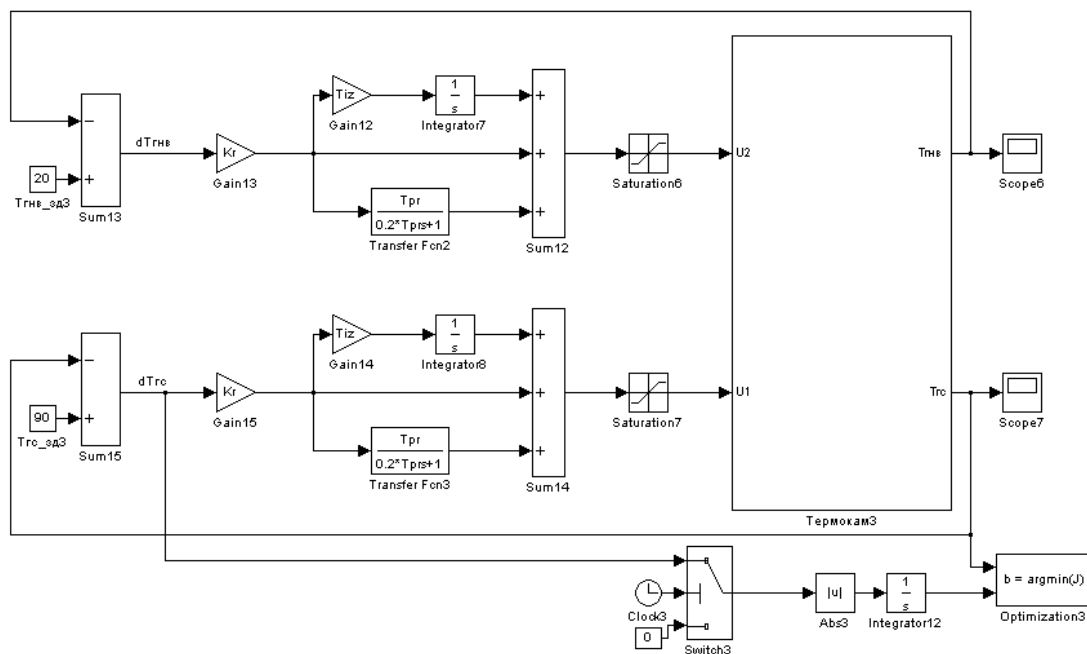
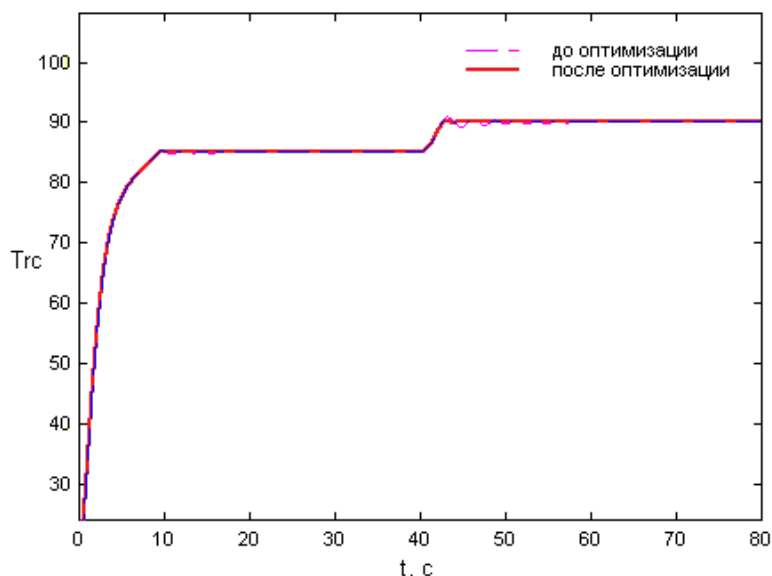


Рис. 3.7 - Структурна схема моделювання САР для оптимізації налаштувань ПІД-регулятора



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
Kr	250	1	98.8	250	до - 11.2288
Tiz	0.1997	0.01	0.654	10	после - 7.7828
Tpr	0.38325	0.01	0.2	10	оптимизации.
					Количество шагов
					процедуры оптимизации:
					максимальное - 1500
					фактическое - 196

Рис. 3.8 – Результати оптимізації налаштувань ПІД-регулятора температури на виході рекуператора

3.4. Розробка моделі САУ з нечітким регулятором (НР) для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання .

3.4.1. Розробка моделі САУ з нечітким регулятором (НР) за алгоритмом Сугену 0-го порядку для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.

З урахуванням особливостей рекуператора тепла повітря/повітря, як нелінійного об'єкта управління, доцільно застосувати в контурі регулювання відносної вологості 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 рекуператора 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: фазифікація, логічного висновку і дефазифікація. Спрощена структурна схема розробляємої системи керування на базі нечіткого регулятора представлена на рисунку 3.9. З погляду структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних нечітких регуляторів і будується за класичними зразками.

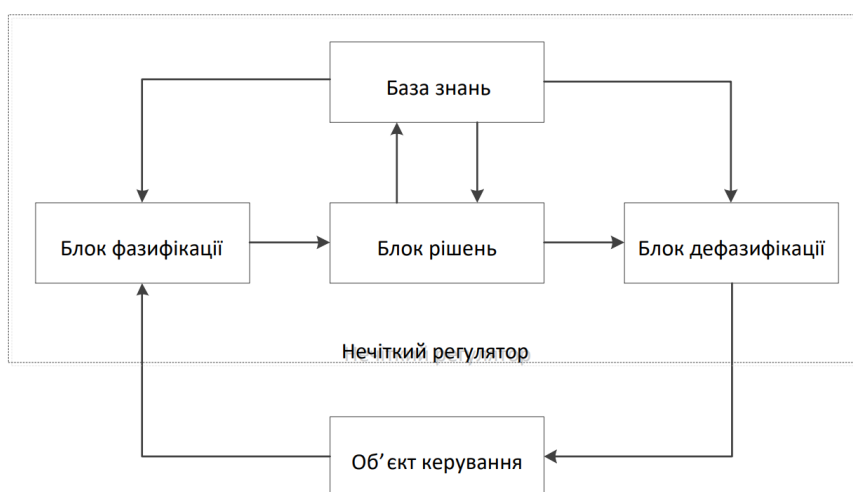


Рис. 3.9 – Спрощена структурна схема нечіткого логічного регулятора

Всі визначені блоки (фазифікація, блок логічного розв'язку, дефазифікація), що представлені на рисунку 6, 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 3.10 зображено вікно налаштування fis-файлу для нечіткого регулятора температури повітря на виході з рекуператора з відповідними вхідними та вихідними сигналами.

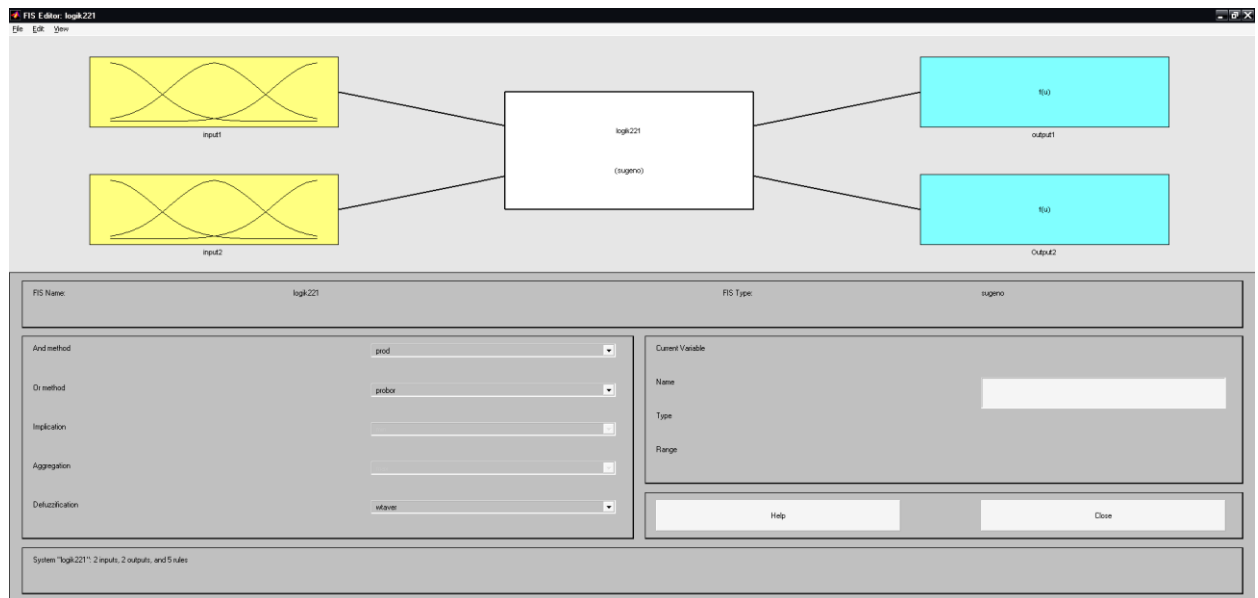


Рис. 3.10 – вікно налаштування нечіткого регулятора

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.

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

ПРАВИЛО <1>: ЯКЩО $(x \in A_1 \text{ і } y \in B_1)$, ТО, $z_1 = C_1$,

ПРАВИЛО <2>: ЯКЩО $(x \in A_2 \text{ і } y \in B_2)$, ТО, $z_2 = C_2$,

(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 $u_1 = w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = w_2$;

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 $u_1 = -w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = -w_2$;

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 $u_1 = w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = w_2$;

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 $u_1 = -w_1$, а приріст керуючої дії $\Delta u_1 = -w_2$.

Відповідно вище представленим правилам складемо таблиці баз знань для НЛР відносної вологи у сушильній камері.

Як видно з рисунку 3.10, 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 приналежності і найбільш часто застосовується. Трикутна функція приналежності задається наступною аналітичною формулою:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (3.2)$$

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

Δe_1 e_1	NE (Велика негативна Δe_1)	Z (приблизно нульова Δe_1)	PE (Велика позитивна Δe_1)
NE	–	$u_1 = 30000$; $\Delta u_1 = 1$;	–
Z	$u_1 = 30000$; $\Delta u_1 = 1$;	$u_1 = 0$; $\Delta u_1 = 0$;	$u_1 = -30000$; $\Delta u_1 = -1$;
PE	–	$u_1 = -30000$; $\Delta u_1 = -1$;	–

Таблиця 3.1 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятора відносної вологи (Сугену)

Всі функції приналежності були визначені у відповідному редакторі на базі експертних даних. На рисунку 3.13 зображено вікно налаштування функцій приналежності $mf1$, $mf2$, $mf3$ до нечітких множин похибка регулювання «велика негативна», «приблизно нульова», «велика позитивна» відповідно. Також були визначені функції приналежності $mf1$, $mf2$, $mf3$ до нечітких множин приріст похибки регулювання «великий негативний», «приблизно нульовий» та «великий позитивний», які представлені на рисунку 3.14.

Згідно з таблицею 3.1 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 3.14.

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

$$y_{out} = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i \cdot C_i)}{\sum_{i=1}^n (\alpha_i)} \quad (3.3)$$

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.

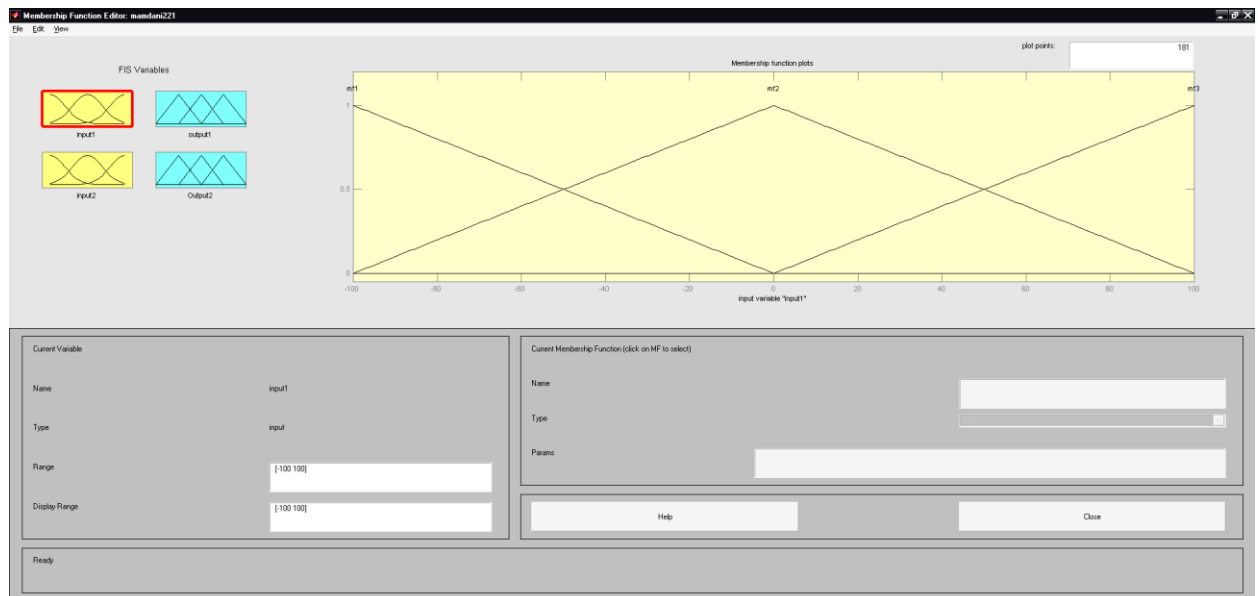


Рис. 3.11 – Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

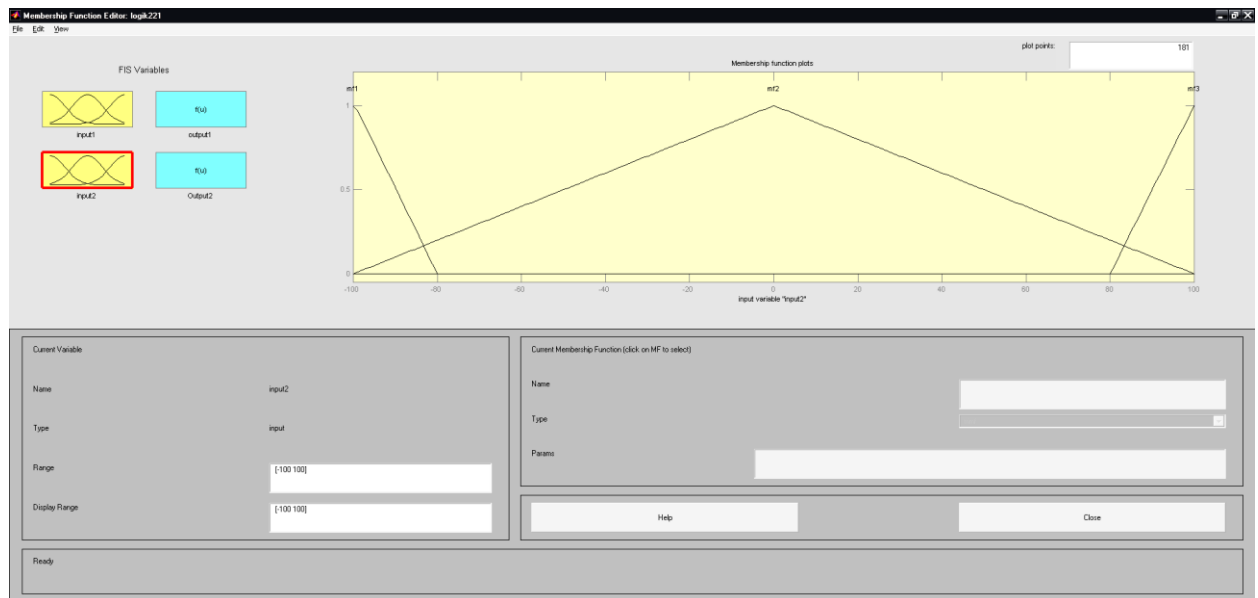


Рис. 3.12 – Вікно формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

У даному випадку вихідні значення сигналів C_i згідно з алгоритмом Сугено нульового порядку були визначені у вікні реактора, представленого на рисунку 3.14. Виходами синтезованого нечіткого регулятора визначені зміни «output1» та «output2». Вихід «output1» буде відпрацьовувати інтегральну І-складову регулятора, а «output2» – відповідно П-складову.

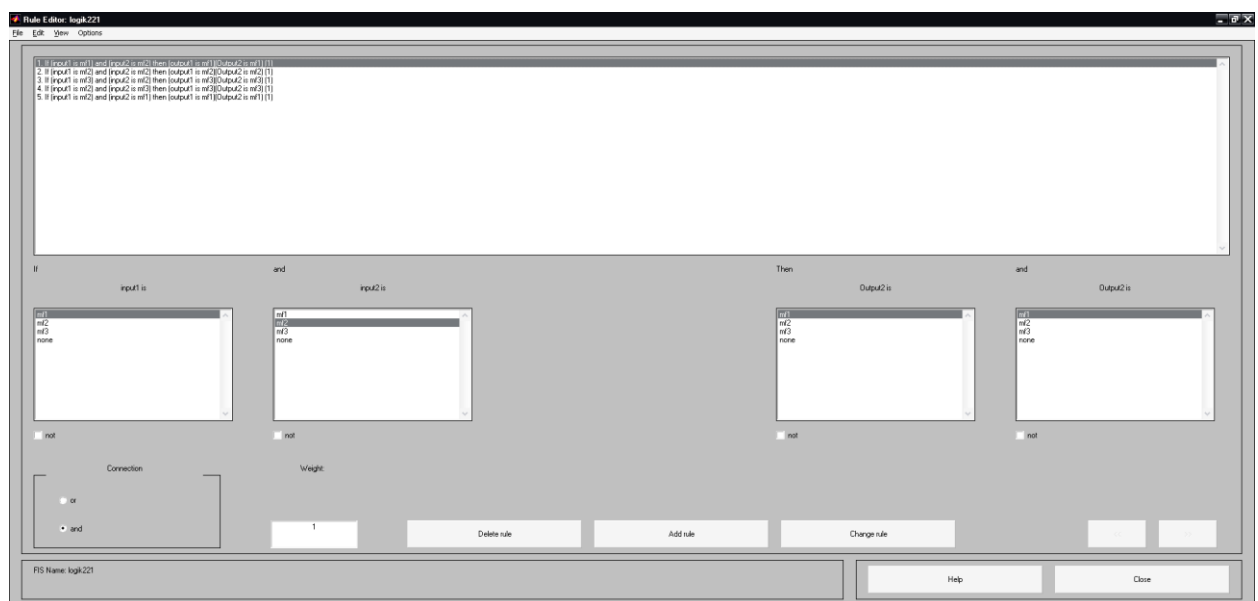


Рис. 3.13 – Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

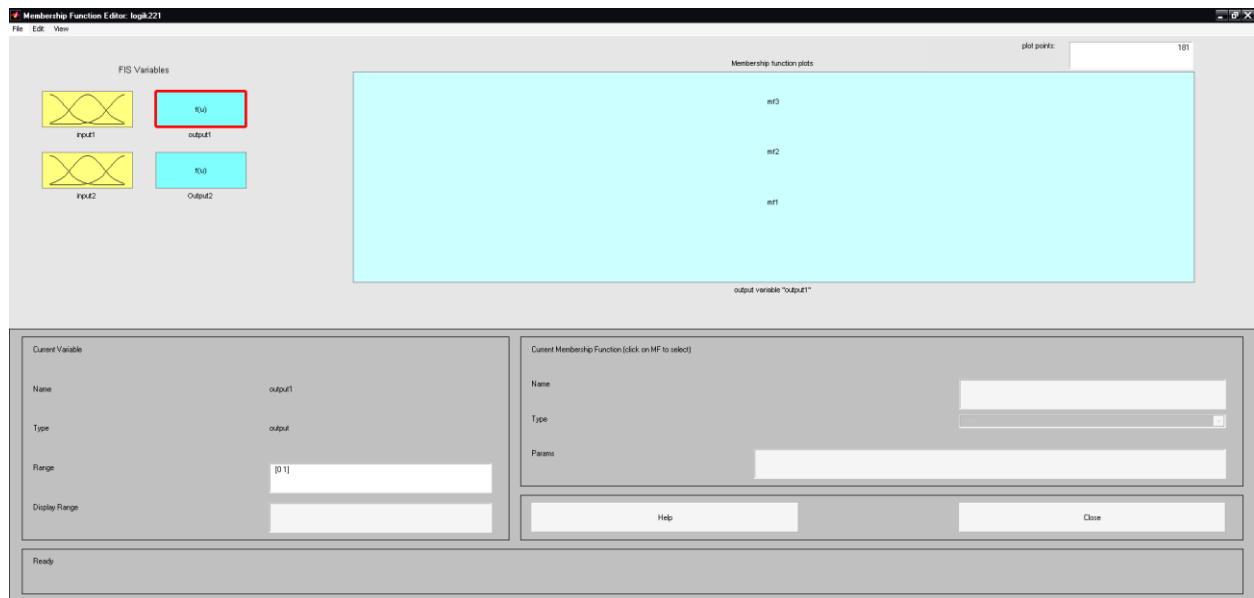


Рис. 3.14 – Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора середовища MATLAB\Simulink

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, рисунок 3.15, а в головному вікні налаштування fis-файлу було вибрано File / Save to Workspace для завантаження у робочий простір середовища MATLAB нечіткого алгоритму управління.

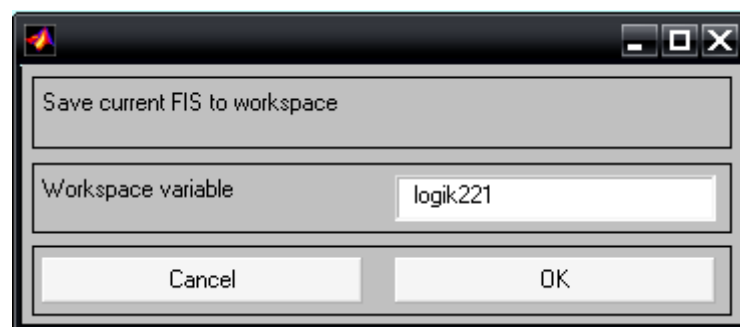


Рис. 3.15 – поле ім'я fis-файлу.

У кінцевому випадку була визначена схема моделювання САУ з нечітким регулятором, фрагмент якої представлений на рисунку 3.16.

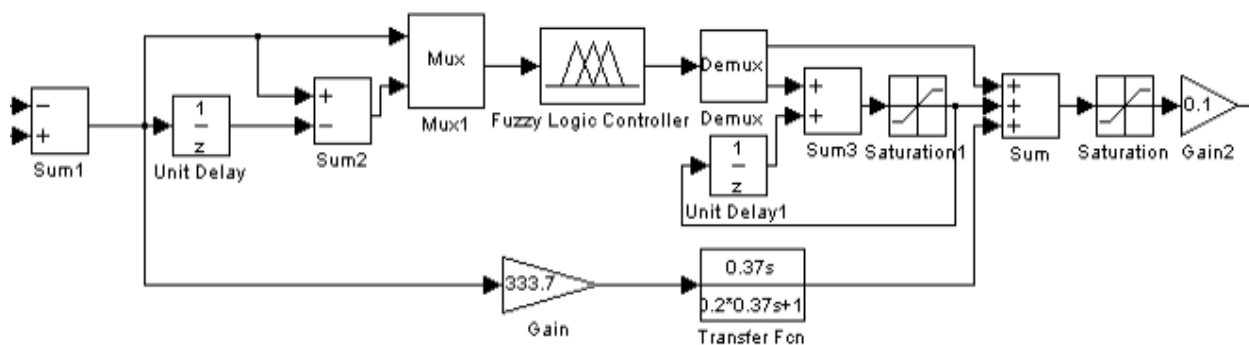


Рис. 3.16 – фрагмент схеми моделювання САУ з нечітким регулятором

З рисунку 3.16 видно, що управляюча дія нечіткого регулятора формується з декілька складових за формулою:

$$u(t) = u_1(t) + (u_2(t - \tau_z) + \Delta u_2) \quad (3.4)$$

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 .

3.4.2. Розробка моделі САУ з нечітким регулятором (НР) за алгоритмом Мамдані для об'єкта з нелінійною статичною характеристикою каналу регулювання.

Для застосування методів нечіткої логіки насамперед необхідно перетворити звичайні чіткі змінні в нечіткі. Процес такого перетворення - фазифікація (від англійської "fuzzy"- "нечіткий"). Він ілюструється на рисунку 3.17. Діапазон зміни змінної розбивається на множини NL, NM, NS, Z, PS, PM, PL, у межах кожної з яких будується функція приналежності змінної кожному з множин. На рисунку 3.17 функції приналежності мають трикутну (найпоширенішу) форму, хоча в загальному випадку вони можуть бути будь-якими, виходячи зі змісту розв'язуваного завдання. Кількість множин також може бути довільним.

Для нечітких множин існує загальноприйнята система позначень: N - негативний (Negative); Z - нульовий (Zero); P - позитивний (Positive); до цих позначень додають букви S (малий, Small), M (середній, Medium), L (великий,

Large). Наприклад, NL - негативний великий; NM - негативний середній (Negative Medium); PL - позитивний великий. Кількість таких змінних (термов) може бути будь-яким, однак зі збільшенням їх кількості суттєво зростають вимоги до експерта, який повинен сформулювати правила для всіх комбінацій вхідних змінних.

Якщо величина помилки e на вході нечіткого регулятора (рис 3.17) мала e_1 (див. рис. 3.18), то відповідне значення нечіткої зміни буде рівно PS зі ступенем приналежності підмножині PS, рівної $\mu(e_1)=0.82$, або рівно PM зі ступенем приналежності $\mu(e_1)=0.18$. Ступінь приналежності помилки e_1 іншим множинами (Z, PL, NS і ін.) дорівнює нулю. Таким чином, величина помилки e_1 виявилася перетвореною в нечіткі змінні. Для виконання функції регулювання над нечіткими змінними повинні бути виконані операції, побудовані на підставі висловлень оператора, сформульованих у вигляді нечітких правил. Сукупність нечітких правил і нечітких змінних використовується для здійснення нечіткого логічного висновку, результатом якого є керуючий вплив на об'єкт керування (див. рисунок 3.17).

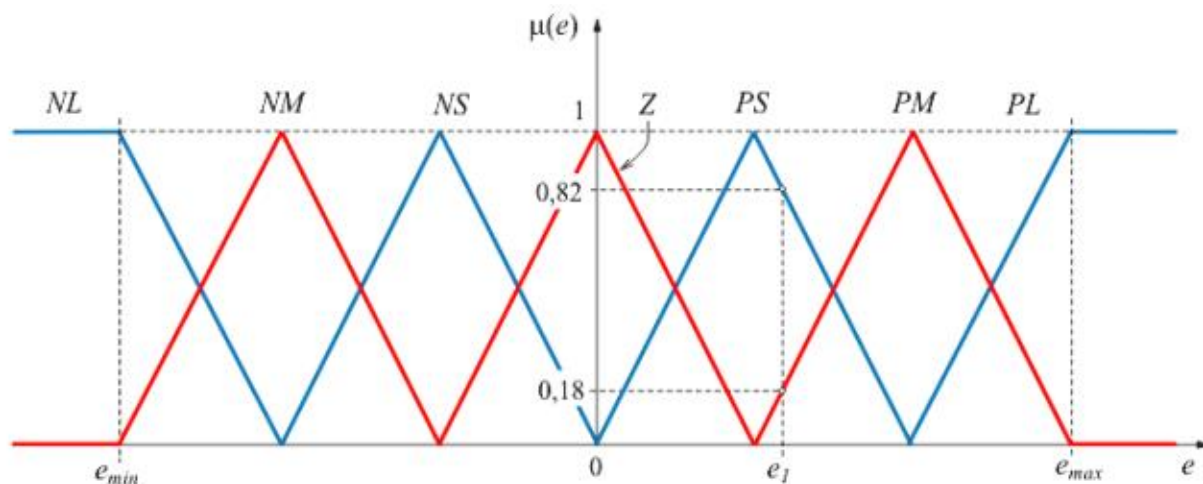


Рис. 3.17 – Розподіл області зміни змінної на множини і т.д. з функціями приналежності трикутної форми

Нечіткий висновок виконується у такий спосіб. Припустимо, що область зміни помилки e розділена на множини N, Z, P, область зміни керуючого впливу - на множини NL, NM, Z PM, PL, тоді за допомогою експерта вдалося б сформулювати наступні правила роботи регулятора:

Правило 1: якщо $e=N_i = de/dt$ P, де $u=Z$;

Правило 2: якщо $e=N_i = de/dt$ P, де $u= NM$;

Правило 3: якщо $e= N_i = de/dt$ P , де $u= NL$;

Правило 4: якщо $e= N_i = de/dt$ P, де $u= PM$;

Правило 5: якщо $e= N_i = de/dt$ P, де $u= Z$;

Правило 6: якщо $e= N_i = de/dt$ P, де $u= NM$;

Правило 7: якщо $e= N_i = de/dt$ P, де $u= PL$;

Правило 8: якщо $e=N_i = de/dt$ P, де $u= PM$;

Правило 9: якщо $e= N_i = de/dt$ P, де $u= NM$.

Наведені правила часто записують у більш компактному табличному вигляді (рисунок 3.18). Використовуючи правила, можна одержати значення керуючої зміни на виході нечіткого регулятора. Для цього потрібно знайти функцію приналежності зміни , утвореної за результатом виконання операцій висновку над множинами, що входять до системи правил (1).

			$\frac{de}{dt}$	
		<i>P</i>	<i>Z</i>	<i>N</i>
	<i>N</i>	<i>Z</i>	<i>NM</i>	<i>NL</i>
<i>e</i>	<i>Z</i>	<i>PM</i>	<i>Z</i>	<i>NM</i>
	<i>P</i>	<i>PL</i>	<i>PM</i>	<i>Z</i>

Рис. 3.18 – Представлення нечітких правил у табличній формі

Операція "I" у правилах (1) відповідає перетинанню множин, а результат застосування всіх правил відповідає операції об'єднання множин. Функція приналежності для перетинання двох множин, наприклад, i (див. Правило 1) описується як:

$$\mu_{e \cap de/dt} = \min(\mu_e, \mu_{de/dt}), \quad (2)$$

де кожне значення функції приналежності перетинання множин дорівнює найменшому значенню із двох, що знаходиться у круглих дужках в (10).

Функція приналежності для об'єднання тих же множин має вигляд:

$$\mu_{e \cup de/dt} = \max(\mu_e, \mu_{de/dt}). \quad (3)$$

Функції приналежності, отримані при перетинанні або об'єднанні множин, можуть бути визначені різними способами, залежно від змісту розв'язуваного завдання.

Функції приналежності для кожного з множин NL, NM, Z PM, PL, що входять у нечітку змінну в правилах (9), виходять у вигляді:

$$\begin{aligned} \mu_{\Pi 1}(\tilde{u}) &= \min\{\mu_{u1}(\tilde{u}), \min\{\mu_{e1}(e), \mu_{de/dt1}(de/dt)\}\}, \\ \mu_{\Pi 2}(\tilde{u}) &= \min\{\mu_{u2}(\tilde{u}), \min\{\mu_{e2}(e), \mu_{de/dt2}(de/dt)\}\}, \\ &\dots \\ \mu_{\Pi 9}(\tilde{u}) &= \min\{\mu_{u9}(\tilde{u}), \min\{\mu_{e9}(e), \mu_{de/dt9}(de/dt)\}\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Тут кожне з 9-ох рівнянь відповідає одному із правил (1). Результуюча функція приналежності керуючого впливу, отримана після застосування всіх 9-ох правил, перебуває як об'єднання функцій приналежності всіх правил:

$$\mu(\tilde{u}) = \max\{\mu_{\Pi 1}(\tilde{u}), \mu_{\Pi 2}(\tilde{u}), \dots, \mu_{\Pi 9}(\tilde{u})\}. \quad (5)$$

Тепер, коли отримана результуюча функція приналежності керуючого впливу, виникає питання, яке конкретне значення керуючого впливу потрібно вибрати. Якщо використовувати імовірнісну інтерпретацію теорії нечітких множин, то стає зрозуміло, що таке значення можна одержати за аналогією з математичним очікуванням керуючого впливу у вигляді:

$$u = \frac{\int_{u_{\min}}^{u_{\max}} \tilde{u} \mu(\tilde{u}) d\tilde{u}}{\int_{u_{\min}}^{u_{\max}} \mu(\tilde{u}) d\tilde{u}}. \quad (3.5)$$

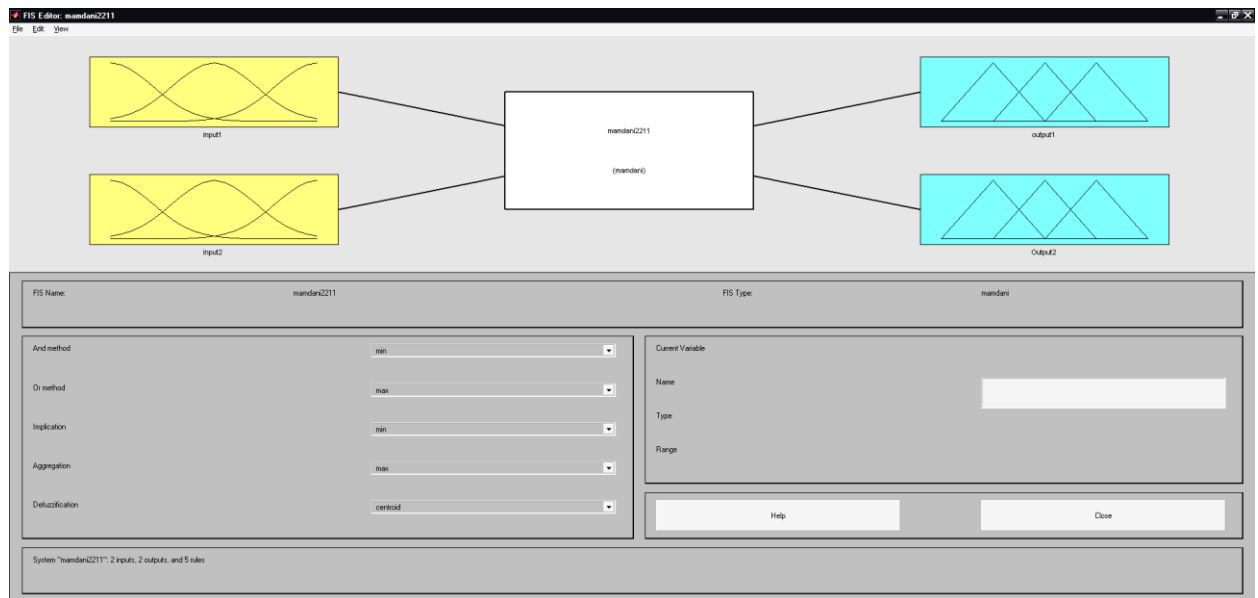


Рис. 3.19 – вікно налаштування нечіткого регулятора Мамдані

Δe_1 e_1	PE (Велика позитивна Δe_1)	Z (приблизно нульова Δe_1)	NE (Велика негативна Δe_1)
NE	—	$u_1 = PE;$ $\Delta u_1 = PE;$	—
Z	$u_1 = PE;$ $\Delta u_1 = PE;$	$u_1 = Z;$ $\Delta u_1 = Z;$	$u_1 = NE;$ $\Delta u_1 =$ NE;
PE	—	$u_1 = NE;$ $\Delta u_1 = NE;$	—

Таблиця 3.2 – Таблиця бази знань для нечіткого логічного регулятора температури повітря на виході з рекуператора

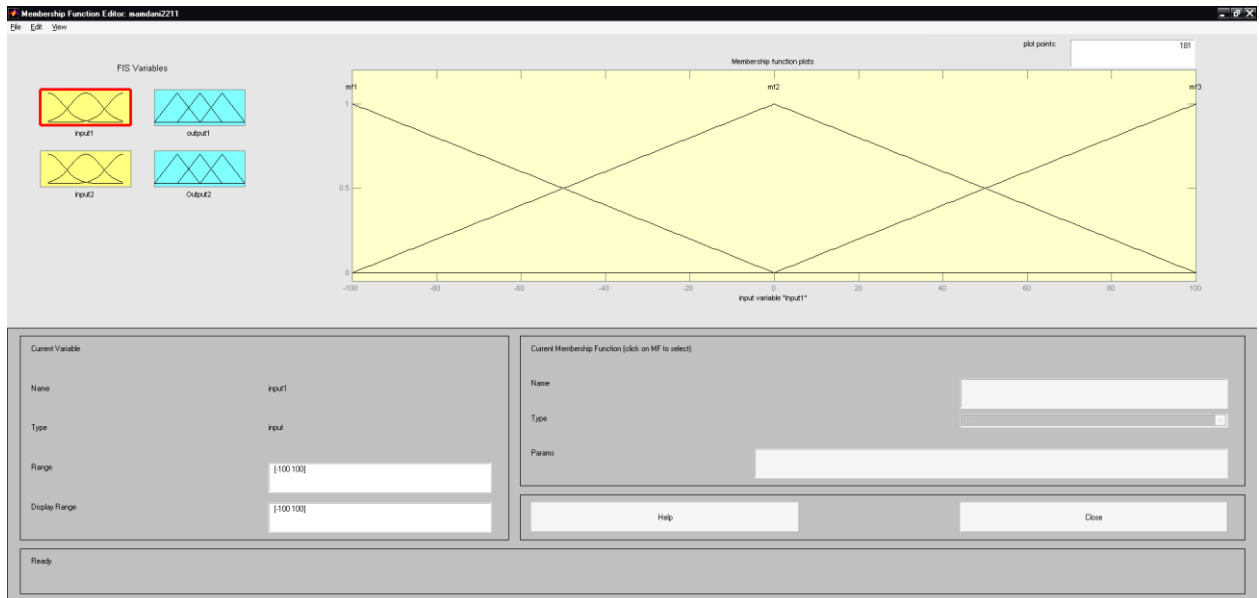


Рис. 3.20 – Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей помилка PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора Мамдані в середовищі MATLAB\Simulink

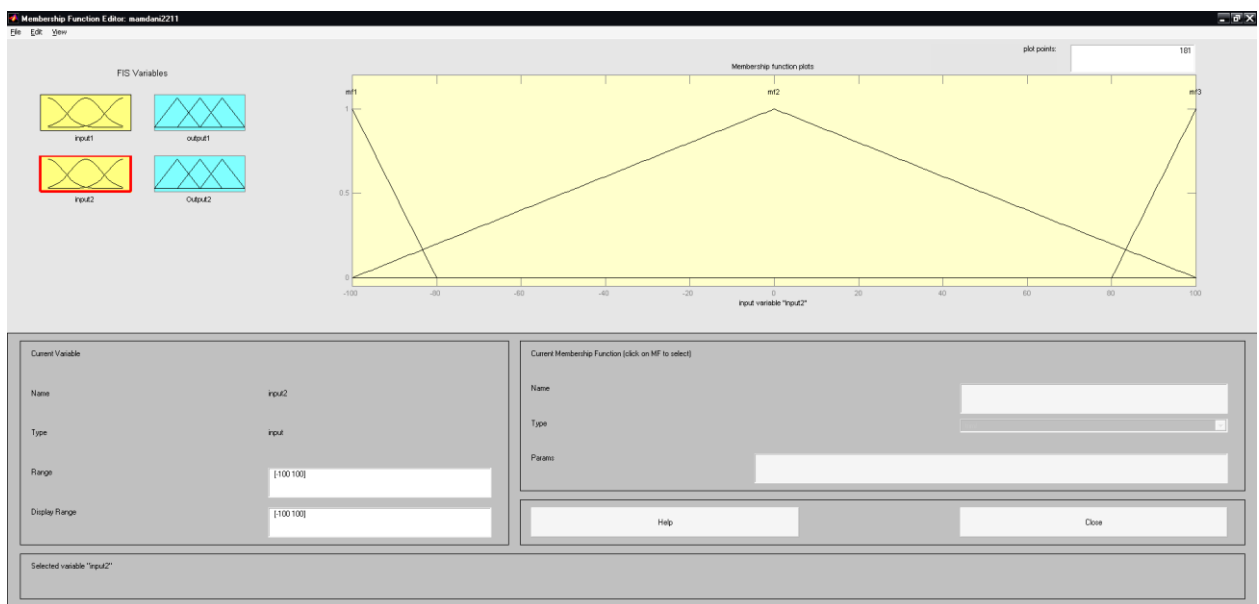


Рис. 3.21 – Вікна формування функцій приналежностей до нечітких безлічей збільшення значення помилки PE, Z, NE редактора нечіткого регулятора Мамдані в середовищі MATLAB\Simulink

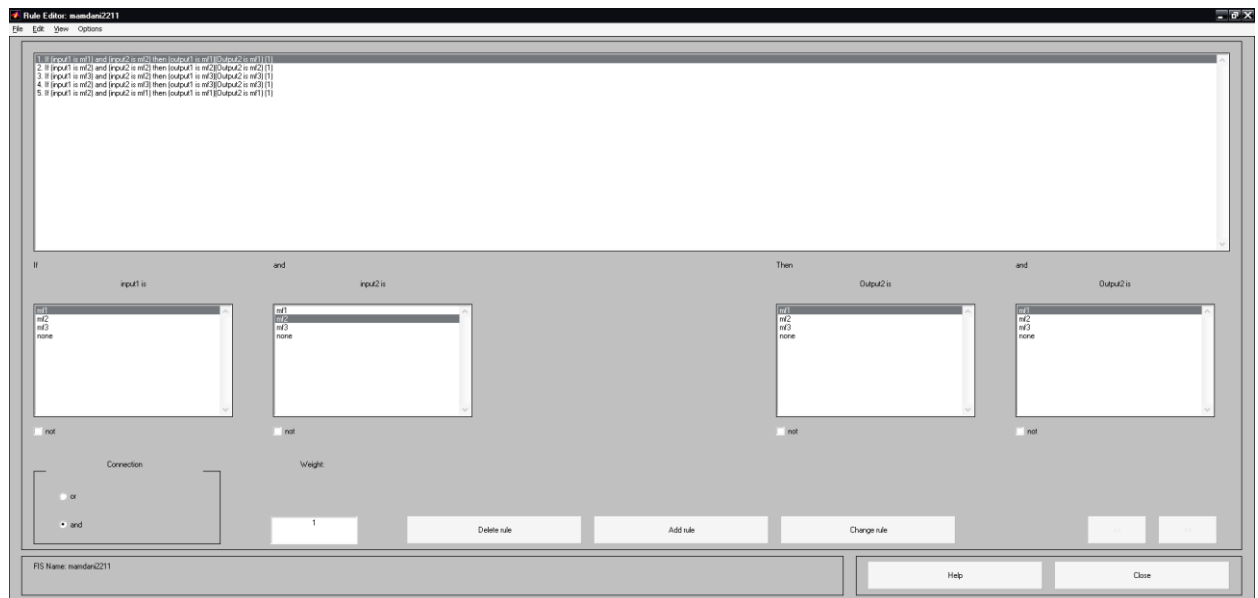


Рис. 3.22 – Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора Мамдані в середовищі MATLAB\Simulink

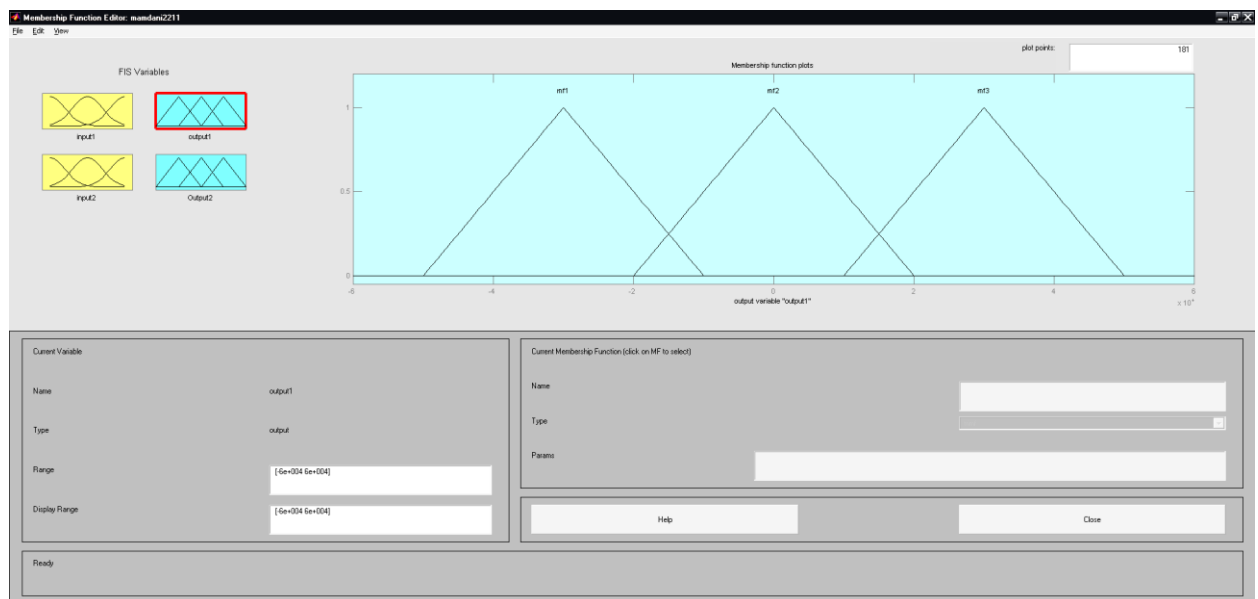


Рис. 3.23 – Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора Мамдані в середовищі MATLAB\Simulink

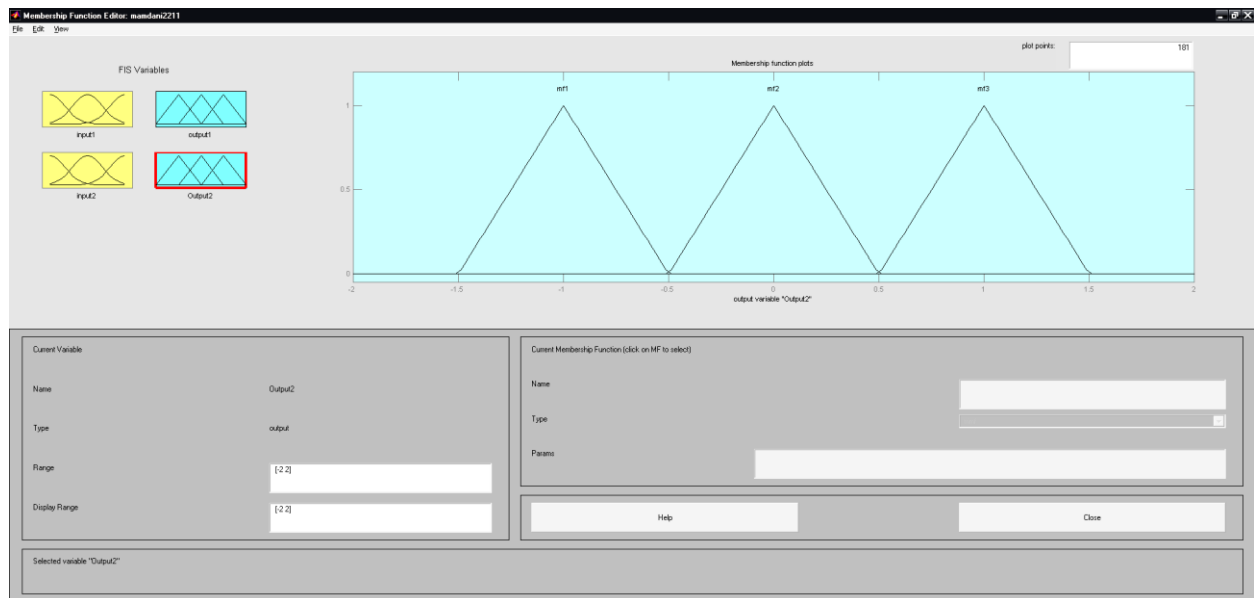


Рис. 3.24 – Вікно редактора правил функціонування нечіткого регулятора Мамдані в середовищі MATLAB\Simulink

3.5. Порівняльний аналіз функціонування САУ з традиційним ПД регулятором і САУ з нечітким регулятором.

У результаті моделювання САУ з нечітким регулятором за алгоритмом Сугено 0-порядку та алгоритму Мамдані 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 ПД-регулятором. Схеми моделювання відповідних САК представлені на рисунку 3.25.

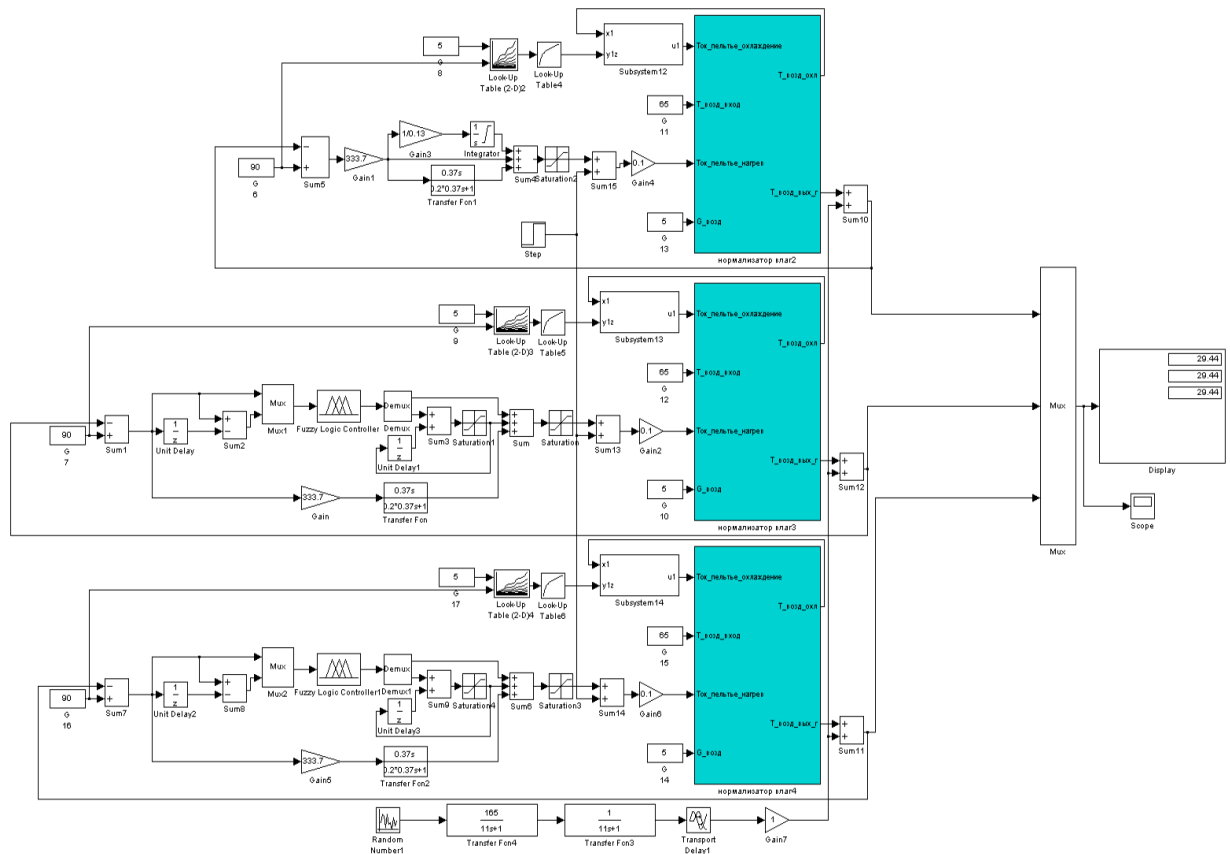


Рис. 3.25 – схеми моделювання САК з традиційним ПД-регулятором, нечітким регулятором Сугену 0-го порядку та нечітким регулятором Мамдані.

Таким чином, на рисунку 3.26 представлені графіки перехідних процесів з виходу системи на номінальний режим функціонування. А на рисунку 3.27 представлені графіки динамічних процесів при детермінованому впливі, що збуджує, і при випадковому впливі, що був введений на 2000 секунді.

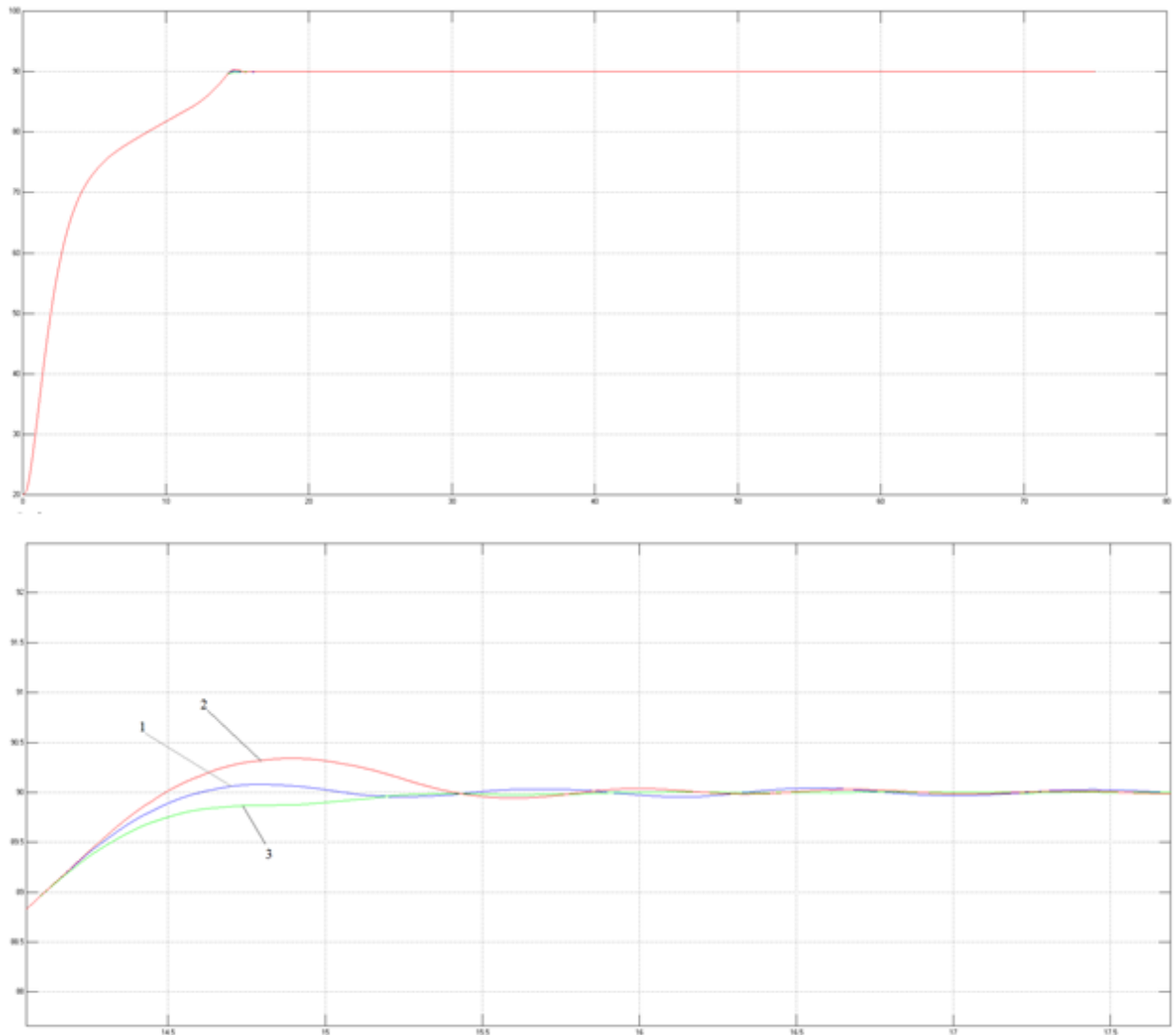


Рис. 3.26 – Графіки перехідних процесів, що отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес в САУ з традиційним ПД – регулятором; графік 2 – перехідний процес в САУ з нечітким регулятором Сугено 0-порядку 3- перехідний процес у САУ з нечітким регулятором Мамдані.

З рисунків можна побачити, що за якістю регулювання різні САУ функціонують майже ідентично, як з традиційним, так і з нечітким регулятором. Графіки перехідних процесів різних 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.

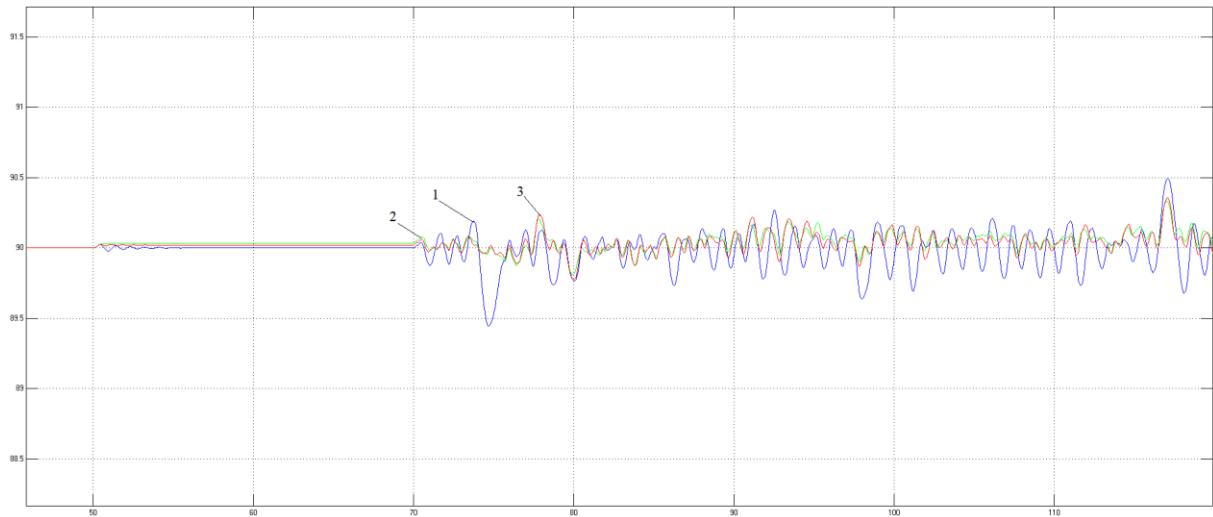


Рис. 3.27 – Графіки перехідних процесів що отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором Сугену 0-порядку; 3- перехідний процес у САУ з нечітким регулятором Мамдані.

3.6. Обґрунтування актуальності застосування нейромережевих алгоритмів управління.

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.

Штучні нейронні мережі (ШНМ) у цей час знаходять широке застосування в самих різних предметних областях. Одним з важливих напрямків використання штучних нейронних мереж є нейрокерування в системах автоматичного керування різних типів. Нейрокерування — це окремий випадок інтелектуального керування, при якому у якості інструмента для розв'язку завдань керування застосовуються штучні нейронні мережі.

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 нейронна мережа – це математична модель з параметрами, що оптимізуються, яка буде виконувати функції розробленого раніше нечіткого логічного регулятора.

3.7. Розробка моделі САК з нейрорегулятором.

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. Нейронна 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 нейромережевих алгоритмів управління.

Математична модель, що застосовується у якості нейронелементу у нейромережевому алгоритмі управління, аналогічна відомим найбільш розповсюдженим моделям, які схожі з формальною моделлю нейрона Маккаллоха – Пітса. 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:

$$x_1 w_1 + x_2 w_2 + \dots + x_n w_n = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (3.6)$$

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 нейронрегулятора 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 3.29.

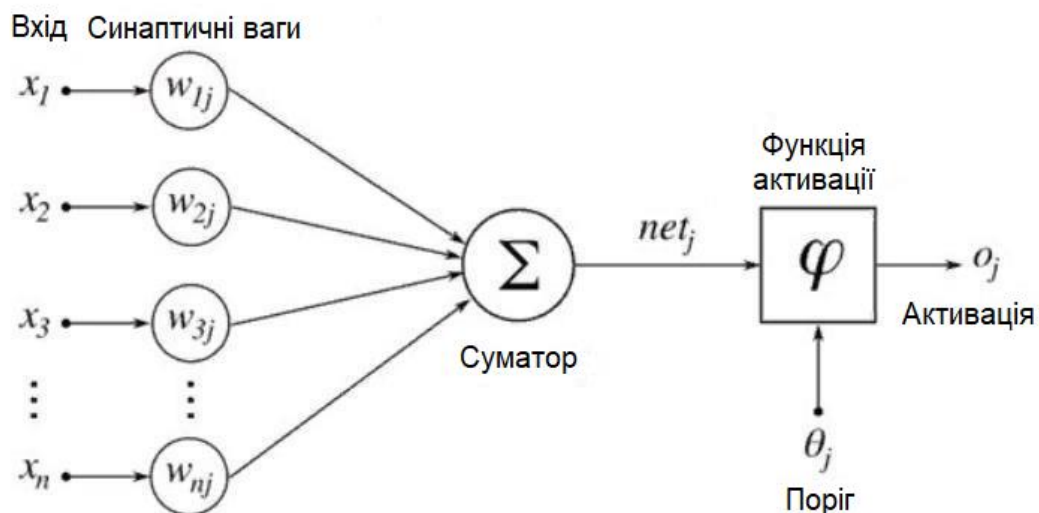


Рис. 3.28 – Структурна схема моделі нейроелемента нейронного регулятора

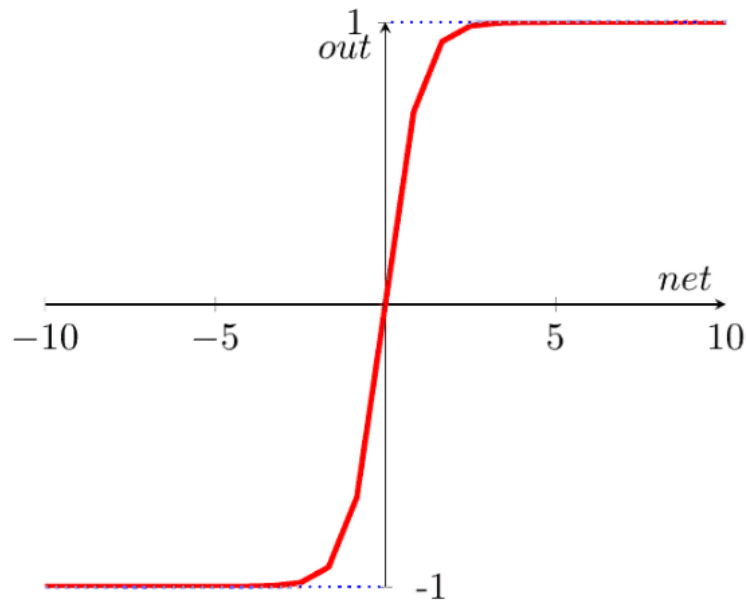


Рис. 3.29 – Графічне представлення функції активації штучного нейрона, що застосовується у нейрорегуляторі

А Аналітично функція записується у наступному вигляді:

$$f(net) = \frac{2}{1 + \exp(-\alpha \cdot net)} - 1, \quad (3.7)$$

де net – 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 3.30. На рисунку 3.30 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.

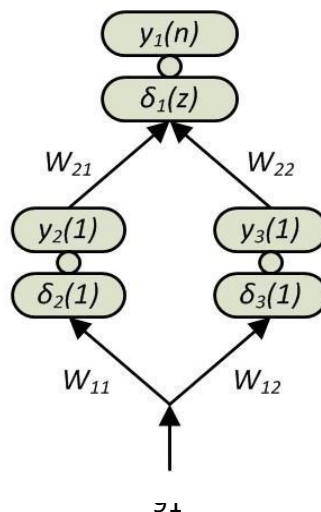


Рис. 3.30 - Структурна схема нейрорегулятора інтегральної або пропорційної складової

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.

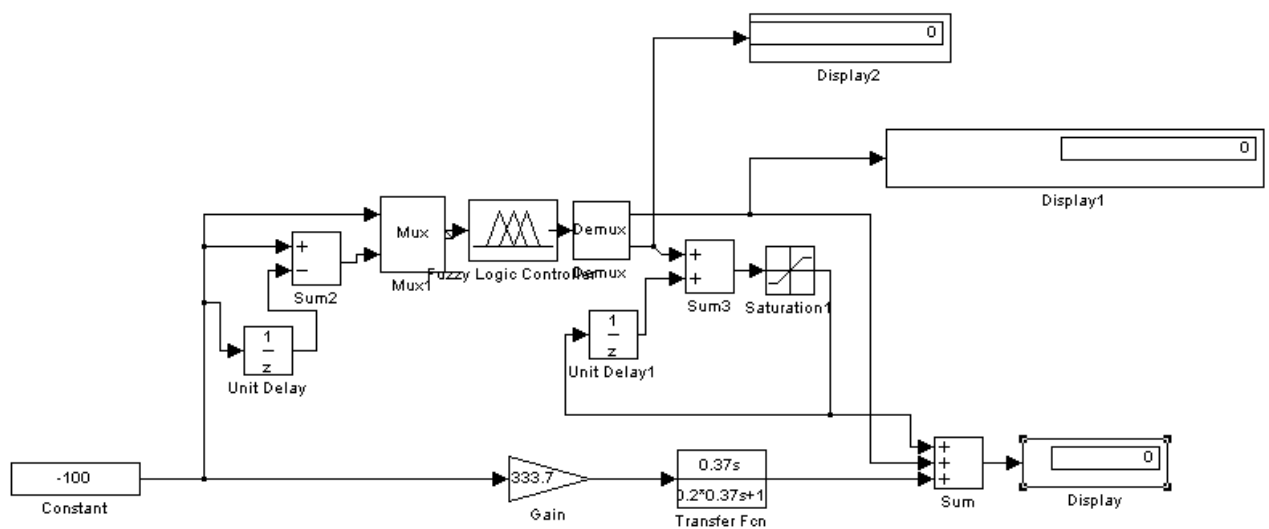


Рис. 3.31 – Схема для отримання даних для навчання нейронної мережі

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 3.3). Дані, представлені у таблиці 3.3, визначені на базі моделювання нечіткого регулятора.

№	dy	u	du
1	-100,0000000000	-0,3000000000	0,0000100000
2	-75,0000000000	-0,2250000000	-

			0,0000075000
3	-50,0000000000	-0,1500000000	- 0,0000050000
4	-30,0000000000	-0,0900000000	- 0,0000030000
5	-20,0000000000	-0,0600000000	- 0,0000020000
6	-10,0000000000	-0,0300000000	- 0,0000010000
7	-7,5000000000	-0,0225000000	- 0,0000007500
8	-5,0000000000	-0,0150000000	- 0,0000005000
9	-3,0000000000	-0,0090000000	- 0,0000003000
10	-2,0000000000	-0,0060000000	- 0,0000002000
11	-1,0000000000	-0,0030000000	- 0,0000001000
12	-0,7500000000	-0,0022500000	- 0,0000000750
13	-0,5000000000	-0,0015000000	- 0,0000000500
14	-0,3000000000	-0,0009000000	- 0,0000000300
15	-0,2000000000	-0,0006000000	- 0,0000000200
16	-0,1000000000	-0,0003000000	- 0,0000000100
17	-0,0750000000	-0,0002250000	- 0,0000000075
18	-0,0500000000	-0,0001500000	- 0,0000000050

19	-0,0300000000	-0,0000900000	- 0,0000000030
20	-0,0200000000	-0,0000600000	- 0,0000000020
21	-0,0100000000	-0,0000300000	- 0,0000000010
22	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
23	0,0001000000	0,0000003000	0,0000010000
24	0,0000200000	0,0000006000	0,0000020000
25	0,0003000000	0,0000009000	0,0000033000
26	0,0005000000	0,0000015000	0,0000050000
27	0,0007500000	0,0000022500	0,0000075000
28	0,0010000000	0,0000030000	0,0000100000
29	0,0020000000	0,0000060000	0,0000200000
30	0,0030000000	0,0000090000	0,0000300000
31	0,0050000000	0,0000150000	0,0000500000
32	0,0007500000	0,0000225000	0,0000750000
33	0,0100000000	0,0000300000	0,0001000000
34	0,0200000000	0,0000600000	0,0002000000
35	0,0300000000	0,0000090000	0,0003000000
36	0,0500000000	0,0001500000	0,0005000000
37	0,0750000000	0,0002250000	0,0007500000
38	0,1000000000	0,0003000000	0,0010000000
39	0,2000000000	0,0006000000	0,0020000000
40	0,3000000000	0,0009000000	0,0030000000
41	0,5000000000	0,0015000000	0,0050000000
42	0,7500000000	0,0022500000	0,0075000000
43	1,0000000000	0,0030000000	0,0100000000
44	2,0000000000	0,0060000000	0,0200000000
45	3,0000000000	0,0090000000	0,0300000000
46	5,0000000000	0,0150000000	0,0500000000
47	7,5000000000	0,0225000000	0,0750000000

48	10,0000000000	0,0300000000	0,1000000000
49	20,0000000000	0,0600000000	0,2000000000
50	30,0000000000	0,0900000000	0,3000000000
51	75,0000000000	0,1500000000	0,5000000000
52	50,0000000000	0,2250000000	0,7500000000
53	100,0000000000	0,3000000000	1,0000000000

Таблиця 3.3 – Вхідні та вихідні значення сигналів регулятора

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 3.31.

В М-файлі було записано виконавчий код, що представлений на рисунках 3.32 і 3.33 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.

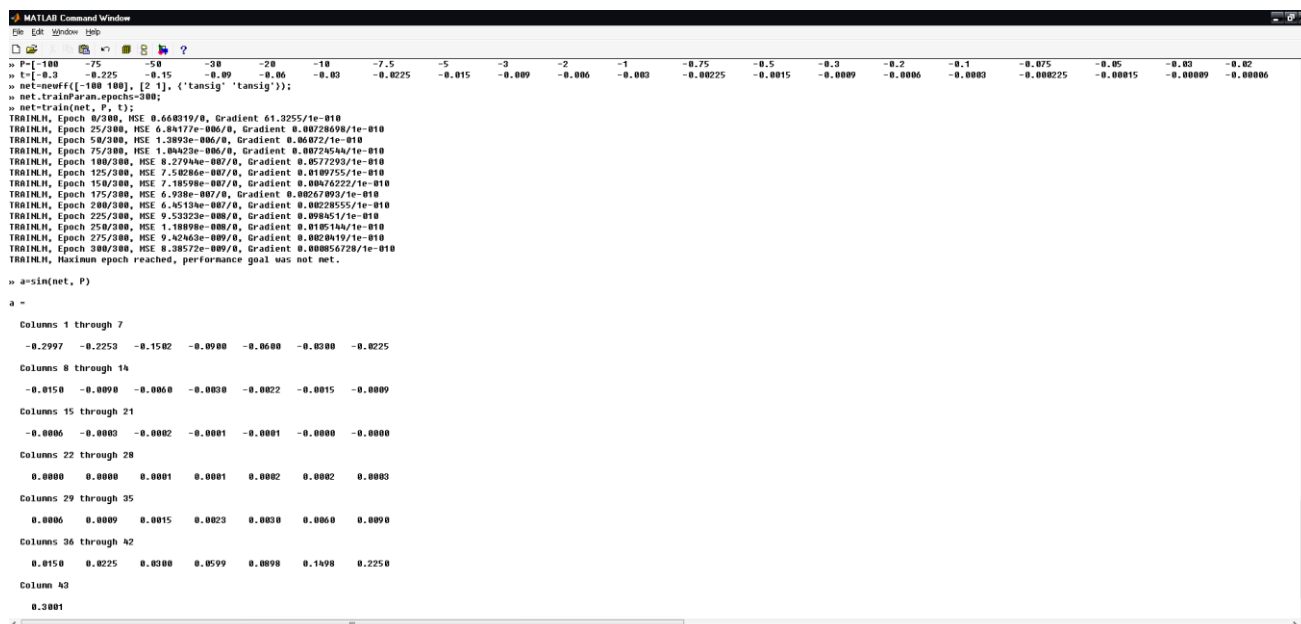


Рис. 3.32 – Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює пропорційну складову нейрорегулятора

Виконавчий код для п-складової:

	» P=[-100 -75 -50 -30 -20 -10 -7.5 -5 -3 -2 -													
1	-0.75	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1		-0.075	-0.05	-0.03	-0.02				
-0.01	0	0.01	0.02	0.03	0.05	0.075	0.1	0.2	0.3	0.5	0.75	1	2	3
5	7.5	10	20	30	50	75	100];							

```

    » t=[-0.3   -0.225  -0.15   -0.09   -0.06   -0.03   -0.0225  -0.015  -0.009   -
0.006   -0.003   -0.00225  -0.0015  -0.0009   -0.0006  -0.0003   -0.000225  -
0.00015  -0.00009  -0.00006   -0.00003   0       0.00003  0.00006  0.00009  0.00015
0.0000225 0.0003  0.0006  0.0009  0.0015  0.00225  0.003  0.006  0.009  0.015  0.0225  0.03  0.06
0.09  0.15  0.225  0.3];

```

```
» net=newff([-100 100], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
```

```
» net.trainParam.epochs=300;
```

```
» net=train(net, P, t);
```

TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.660319/0, Gradient 61.3255/1e-010

TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 6.84177e-006/0, Gradient 0.00728698/1e-010

TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 1.3893e-006/0, Gradient 0.06072/1e-010

TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 1.04423e-006/0, Gradient 0.00724544/1e-010

TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 8.27944e-007/0, Gradient 0.0577293/1e-010

TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 7.50286e-007/0, Gradient 0.0109755/1e-010

TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 7.18598e-007/0, Gradient 0.00476222/1e-010

TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 6.938e-007/0, Gradient 0.00267093/1e-010
 TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 6.45134e-007/0, Gradient 0.00228555/1e-010
 TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 9.53323e-008/0, Gradient 0.098451/1e-010
 TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 1.18898e-008/0, Gradient 0.0105144/1e-010
 TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 9.42463e-009/0, Gradient 0.0020419/1e-010
 TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 8.38572e-009/0, Gradient 0.000856728/1e-010
 TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, P)

a =

Columns 1 through 7

-0.2997 -0.2253 -0.1502 -0.0900 -0.0600 -0.0300 -0.0225

Columns 8 through 14

-0.0150 -0.0090 -0.0060 -0.0030 -0.0022 -0.0015 -0.0009

Columns 15 through 21

-0.0006 -0.0003 -0.0002 -0.0001 -0.0001 -0.0000 -0.0000

Columns 22 through 28

0.0000 0.0000 0.0001 0.0001 0.0002 0.0002 0.0003

Columns 29 through 35

0.0006 0.0009 0.0015 0.0023 0.0030 0.0060 0.0090

Columns 36 through 42

0.0150 0.0225 0.0300 0.0599 0.0898 0.1498 0.2250

Column 43

0.3001

» gensim(net)

```

MATLAB Command Window
File Edit Window Help
» P=[-100 -75 -50 -30 -20 -10 -7.5 -5 -3 -2 -1 -0.75 -0.5 -0.3 -0.2 -0.1 -0.075 -0.05 -0.03 -0.02
» t=[-0.0001 -0.000075 -0.00005 -0.00003 -0.00002 -0.00001 -0.0000075 -0.000005 -0.000003 -0.000002 -0.000001 -0.00000075 -0.0000005 -0.0000003 -0.0000002 -0.0000001 -0.000000075 -0.00000005 -0.00000003 -0.00000002
» net=newff([-100 100], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.215177/0, Gradient 164.568/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 0.000671761/0, Gradient 0.239518/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 0.000584271/0, Gradient 2.07493/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 0.00049211/0, Gradient 0.0754695/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 0.000427926/0, Gradient 0.154464/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 0.000390552/0, Gradient 0.00698314/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 0.00037398/0, Gradient 0.0163826/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 0.00036878/0, Gradient 0.0231725/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 0.000321173/0, Gradient 0.067253/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 0.00019919/0, Gradient 0.0100373/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 0.00019877/0, Gradient 0.002530/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 0.0001987/0, Gradient 0.0021977/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 0.00019867/0, Gradient 0.0004/33/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a=sim(net, P)
a =
Columns 1 through 7
-0.0259 0.0033 0.0009 0.0020 -0.0242 -0.0252 -0.0198
Columns 8 through 14
-0.0122 -0.0045 -0.0002 0.0004 0.0056 0.0069 0.0079
Columns 15 through 21
0.0004 0.0009 0.0098 0.0091 0.0092 0.0093 0.0093
Columns 22 through 28
0.0094 0.0094 0.0095 0.0095 0.0096 0.0098 0.0099
Columns 29 through 35
0.0104 0.0109 0.0120 0.0133 0.0146 0.0202 0.0260
Columns 36 through 42
0.0304 0.0554 0.0739 0.1012 0.1612 0.2665 0.5113 0.7951
Column 43
0.9475

```

Рис. 3.33 – Виконавчий код для генерації нейромережі, що відтворює інтегральну складову нейрорегулятора

Виконавчий код для і-складової:

```

» P=[-100 -75 -50 -30 -20 -10 -7.5 -5 -3 -2 -1 -0.75 -0.5 -0.3 -0.2 -0.1 -0.075 -0.05 -0.03 -0.02
1 -0.75 -0.5 -0.3 -0.2 -0.1 -0.075 -0.05 -0.03 -0.02
-0.01 0 0.01 0.02 0.03 0.05 0.075 0.1 0.2 0.3 0.5 0.75 1 2 3
5 7.5 10 20 30 50 75 100];
» t=[-0.00001 -0.0000075 -0.000005 -0.000003 -0.000002 -0.000001 -0.00000075 -0.0000005 -0.0000003 -0.0000002 -0.0000001 -0.000000075 -0.00000005 -0.00000003 -0.00000002 -0.00000001 -0.0000000075 -0.000000005 -0.000000003 -0.000000002 -0.000000001 0 0.0001 0.0002 0.0003 0.0005 0.00075 0.001 0.002 0.003 0.005 0.0075 0.01 0.02 0.03 0.05 0.075 0.1 0.2 0.3 0.5 0.75 1 ];
» net=newff([-100 100], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, t);

```

TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.215177/0, Gradient 164.568/1e-010
 TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 0.000671761/0, Gradient 0.239518/1e-010
 TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 0.000584271/0, Gradient 2.07493/1e-010
 TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 0.00049211/0, Gradient 0.0754695/1e-010
 TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 0.000427926/0, Gradient 0.154464/1e-010
 TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 0.000390552/0, Gradient 0.00698314/1e-010
 TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 0.00037398/0, Gradient 0.0163826/1e-010

TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 0.000343878/0, Gradient 0.0231721/1e-010
 TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 0.000321173/0, Gradient 0.0672534/1e-010
 TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 0.000319919/0, Gradient 0.0100373/1e-010
 TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 0.000319877/0, Gradient 0.00353349/1e-010
 TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 0.00031987/0, Gradient 0.002197/1e-010
 TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 0.000319867/0, Gradient 0.000447433/1e-010
 TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.

» a=sim(net, P)

a =

Columns 1 through 7

-0.0259 0.0033 0.0309 0.0020 -0.0242 -0.0252 -0.0198

Columns 8 through 14

-0.0122 -0.0045 -0.0002 0.0044 0.0056 0.0069 0.0079

Columns 15 through 21

0.0084 0.0089 0.0090 0.0091 0.0092 0.0093 0.0093

Columns 22 through 28

0.0094 0.0094 0.0095 0.0095 0.0096 0.0098 0.0099

Columns 29 through 35

0.0104 0.0109 0.0120 0.0133 0.0146 0.0202 0.0260

Columns 36 through 42

0.0384 0.0554 0.0739 0.1612 0.2665 0.5113 0.7951

Column 43

0.9475

» gensim(net)

Характеристики точності навчання показані на рисунку 3.34 та 3.35, з яких
 можливо побачити, що десь на 250-м кроці навчання коректування ваг між
 нейронними з'єднаннями було закінчено.

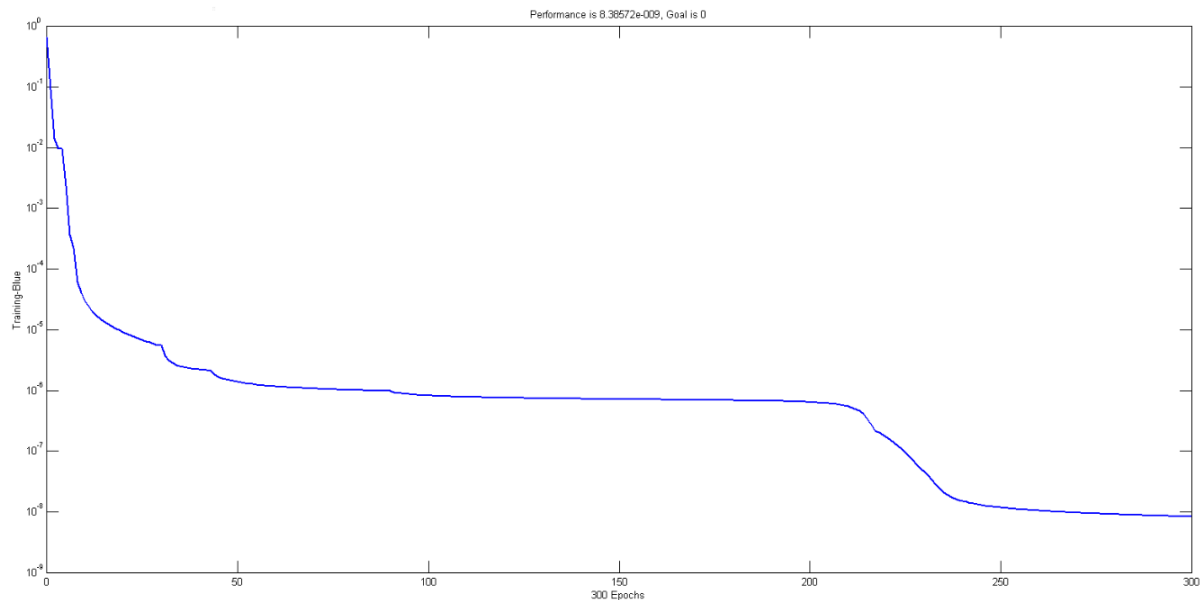


Рис. 3.34 – Характеристика точності навчання пропорційної складової нейрорегулятора

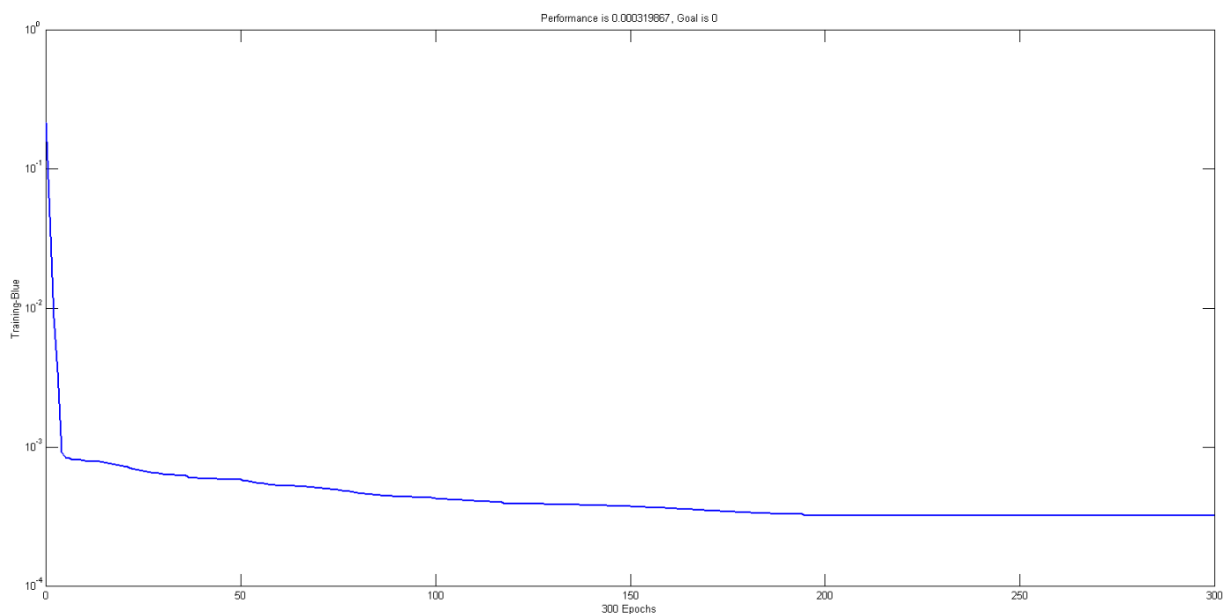


Рис. 3.35 – Характеристика точності навчання інтегральної складової нейрорегулятора

Водночас з генерацією НМ в головному вікні Matlab відображаються фактичні значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону мережі. В таблиці 3.4 наведено бажані та фактичні(згенеровані) значення i - та p -складової.

N	dy	u	u	du	du
		бажане	фактичне	бажане	фактичне

1	- 100,000000000	- 0,300000000	- 0,299700000	- 0,000010000	- 0,000010000
2	- 75,000000000	- 0,225000000	- 0,225300000	- 0,000075000	- 0,000007500
3	- 50,000000000	- 0,150000000	- 0,150200000	- 0,000005000	- 0,000005000
4	- 30,000000000	- 0,090000000	- 0,090000000	- 0,000003000	- 0,000003000
5	- 20,000000000	- 0,060000000	- 0,060000000	- 0,000002000	- 0,000002000
6	- 10,000000000	- 0,030000000	- 0,030000000	- 0,000001000	- 0,000001000
7	- 7,500000000	- 0,022500000	0,02250 00000	- 0,000000750	- 0,000000750
8	- 5,000000000	- 0,015000000	- 0,015000000	- 0,000000500	- 0,000000500
9	- 3,000000000	- 0,009000000	- 0,009000000	- 0,000000300	- 0,000000300
0	- 2,000000000	- 0,006000000	- 0,006000000	- 0,000000200	- 0,000000200
1	- 1,000000000	- 0,003000000	- 0,003000000	- 0,000000100	- 0,000000100
2	- 0,750000000	- 0,002250000	- 0,002200000	- 0,000000075	- 0,000000075
3	- 0,500000000	- 0,001500000	- 0,001500000	- 0,000000050	- 0,000000050
4	- 0,300000000	- 0,000900000	- 0,000900000	- 0,000000030	- 0,000000030
5	- 0,200000000	- 0,000600000	- 0,000600000	- 0,000000020	- 0,000000020
6	- 0,100000000	- 0,000300000	- 0,000300000	- 0,000000010	- 0,000000010
7	- 0,075000000	- 0,000225000	- 0,000200000	- 0,0000000075	- 0,0000000075
1	-	-	-	-	-

8		0,0500000000	0,000150000	0,000100000	0,0000000050	0,0000000050
1		-	-	-	-	-
9		0,0300000000	0,000090000	0,000100000	0,0000000030	0,0000000030
2		-	-	0,00000	-	-
0		0,0200000000	0,000060000	00000	0,0000000020	0,0000000020
2		-	-	0,00000	-	-
1		0,0100000000	0,000030000	00000	0,0000000010	0,0000000010
2		0,000000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2		0000	00000	00000	00000	00000
2		0,010000	0,00003	0,00000	0,00010	0,00010
3		0000	00000	00000	00000	00000
2		0,020000	0,00006	0,00010	0,00020	0,00020
4		0000	00000	00000	00000	00000
2		0,030000	0,00000	0,00010	0,00030	0,00030
5		0000	90000	00000	00000	00000
2		0,050000	0,00015	0,00020	0,00050	0,00050
6		0000	00000	00000	00000	00000
2		0,075000	0,00022	0,00020	0,00075	0,00075
7		0000	50000	00000	00000	00000
2		0,100000	0,00030	0,00030	0,00100	0,00100
8		0000	00000	00000	00000	00000
2		0,200000	0,00060	0,00060	0,00200	0,00200
9		0000	00000	00000	00000	00000
3		0,300000	0,00090	0,00009	0,00300	0,00300
0		0000	00000	00000	00000	00000
3		0,500000	0,00150	0,00150	0,00500	0,00500
1		0000	00000	00000	00000	00000
3		0,750000	0,00225	0,00230	0,00750	0,00750
2		0000	00000	00000	00000	00000
3		1,000000	0,00300	0,00300	0,01000	0,01000
3		0000	00000	00000	00000	00000
3		2,000000	0,00060	0,00600	0,02000	2,00000
4		0000	00000	00000	00000	00000
3		3,000000	0,00900	0,00900	0,03000	0,03000
5		0000	00000	00000	00000	00000

6	3	5,000000	0,01500	0,01500	0,05000	0,05000
		0000	00000	00000	00000	00000
7	3	7,500000	0,02250	0,02250	0,07500	0,07500
		0000	00000	00000	00000	00000
8	3	10,00000	0,03000	0,03000	0,10000	0,10000
		00000	00000	00000	00000	00000
9	3	20,00000	0,06000	0,05990	0,20000	0,20000
		00000	00000	00000	00000	00000
0	4	30,00000	0,09000	0,08980	0,30000	0,30000
		00000	00000	00000	00000	00000
1	4	75,00000	0,15000	0,14980	0,50000	0,50000
		00000	00000	00000	00000	00000
2	4	50,00000	0,22500	0,22500	0,75000	0,75000
		00000	00000	00000	00000	00000
3	4	100,0000	0,30000	0,30010	1,00000	1,00000
		000000	00000	00000	00000	00000

Таблиця 3.4 – бажані та фактичні значення вихідного сигналу i -того вихідного нейрону НМ, що відтворює І- та ІІ- складові.

Виходячи з цих даних, представлених в таблиці 3.4, 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 навчання штучної нейронної мережі за методом зворотного розповсюдження похибки, похибка для вихідного шару нейронної мережі визначається за наступною формулою (3.8):

$$\delta_i(n) = (y_i(n) - d_i) \cdot y_i(n) \cdot (1 - y_i(n)) \quad (3.8)$$

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 (3.9):

$$\delta_i(n) = y_i(n) \cdot (y_i(n) - d_i) \cdot \sum w_{ln+1} \cdot \delta_i(n+1) \quad (3.9)$$

де w_{in+1} – вага між-нейронного з'єднання $n+1$ шару; $\delta_1(n+1)$ – похибка i -того нейрону $n+1$ шару.

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

Розрахунок помилки вихідного шару згідно з таблиці 3.4:

$$\begin{aligned}\delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n)(1 - y_1(n)) == (0.2199 - 1) * (0.2199) * (1 - 0.2199) \\ &= -0,013382\end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned}\delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = \\ &= 0,9542 * (1 - 0,9542) * (-1,0313) * (-0,13382) = \\ &= -0.00654\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= -0,9565 * (1 + 0,9565) * (-1,0846) * (-0,13382) = 0,0271616\end{aligned}$$

Розрахунок помилок для II – складової нейрорегулятора:

Розрахунок помилки вихідного шару:

$$\begin{aligned}\delta_1(z) &= (y_1(n) - d_1) * y_1(n)(1 - y_1(n)) == (0.0899 - 0.09) * (0.0899) * (1 - 0.09) \\ &= -0,0000081\end{aligned}$$

Розрахунок помилки для i -тих нейронів прихованого шару:

$$\begin{aligned}\delta_2(1) &= y_2(1) * (1 - y_2(1)) * W_{21} * \delta_1(z) = \\ &= 0.9686 * (1 - 0.9686) * 0,9978 * (-0.0000081) = 0.0000015 \\ \delta_3(1) &= y_3(1) * (1 - y_3(1)) * W_{22} * \delta_1(z) = \\ &= 0.48 * (1 - 0.4867) * 1,2085 * (-0,0000081) = 0,0000002\end{aligned}$$

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 3.36. У такий спосіб була синтезована модель САУ з нейрорегулятором засобами середовища MATLAB\Simulink, фрагмент структурної схеми якої представлений на рисунку 3.36.

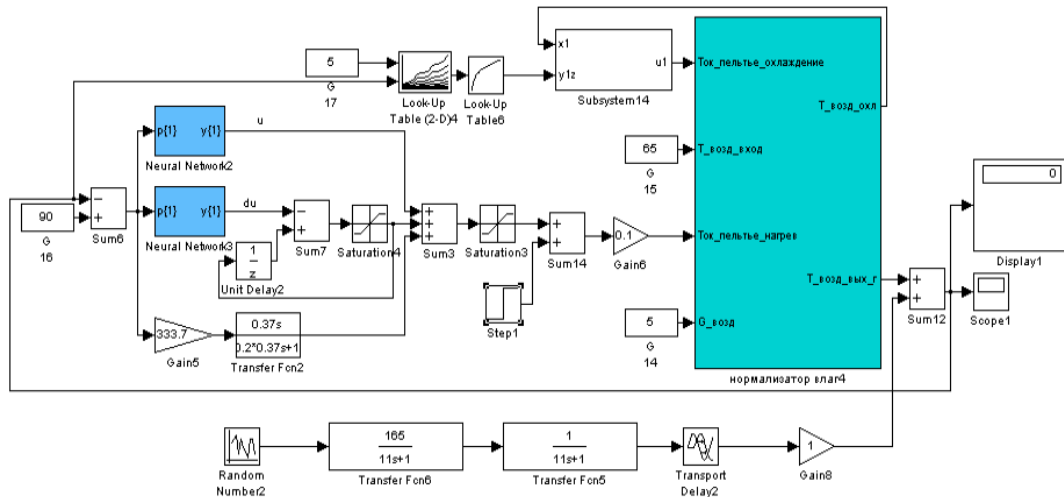


Рис. 3.36 – фрагмент структурної схеми моделі САУ з нейрорегулятором яка представлена засобами середовища MATLAB\Simulink.

На основі даних параметрів сформованої нейронної мережі була визначена схема нейрорегулятора у середовищі MATLAB\Simulink. Схема нейрорегулятора, що представлена на рисунку 3.37, є розгорнутою схемою, що представлена на попередньому рисунку 3.36.

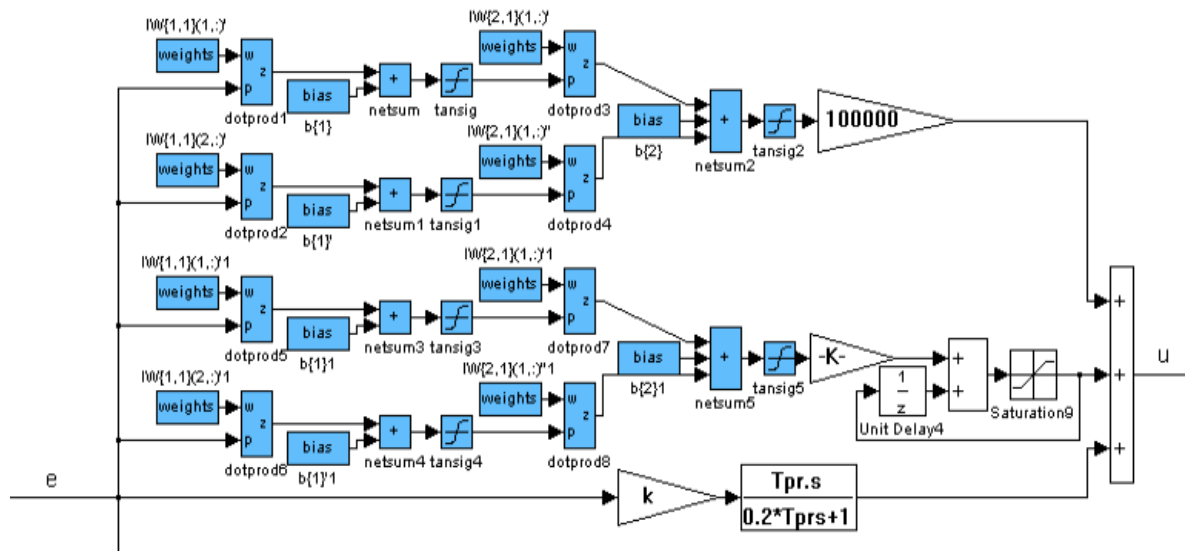


Рис. 3.37 – Схема моделювання нейронного регулятора

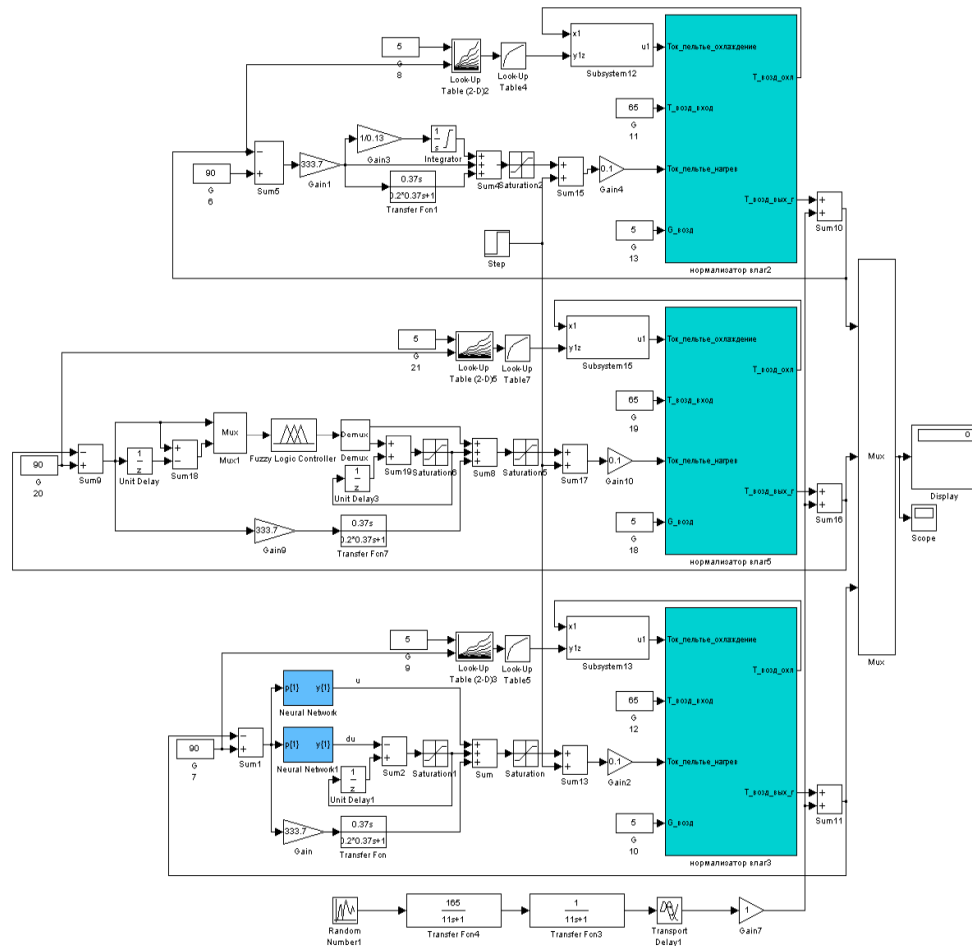


Рис. 3.38 – схема моделювання для порівняння роботи САК з традиційним ПД регулятором, нечітким регулятором за алгоритмом Сугену та нейрорегулятором.

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 ПД-регулятором. Ці графіки представлені на рисунках 3.39 та 3.40. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що за якістю регулювання САУ з нейрорегулятором працює значно гірше, ніж САУ з нечітким регулятором. Час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування складає 15 секунд при САУ з нечітким та традиційним ПД регулятором, і 15 секунд, при САУ з нейронним регулятором. Також максимальне динамічне відхилення при детермінованому та випадковому впливі, що збурює, значно більше в САУ з нейрорегулятором, як показано на рисунку 3.40. 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 3.37, 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.

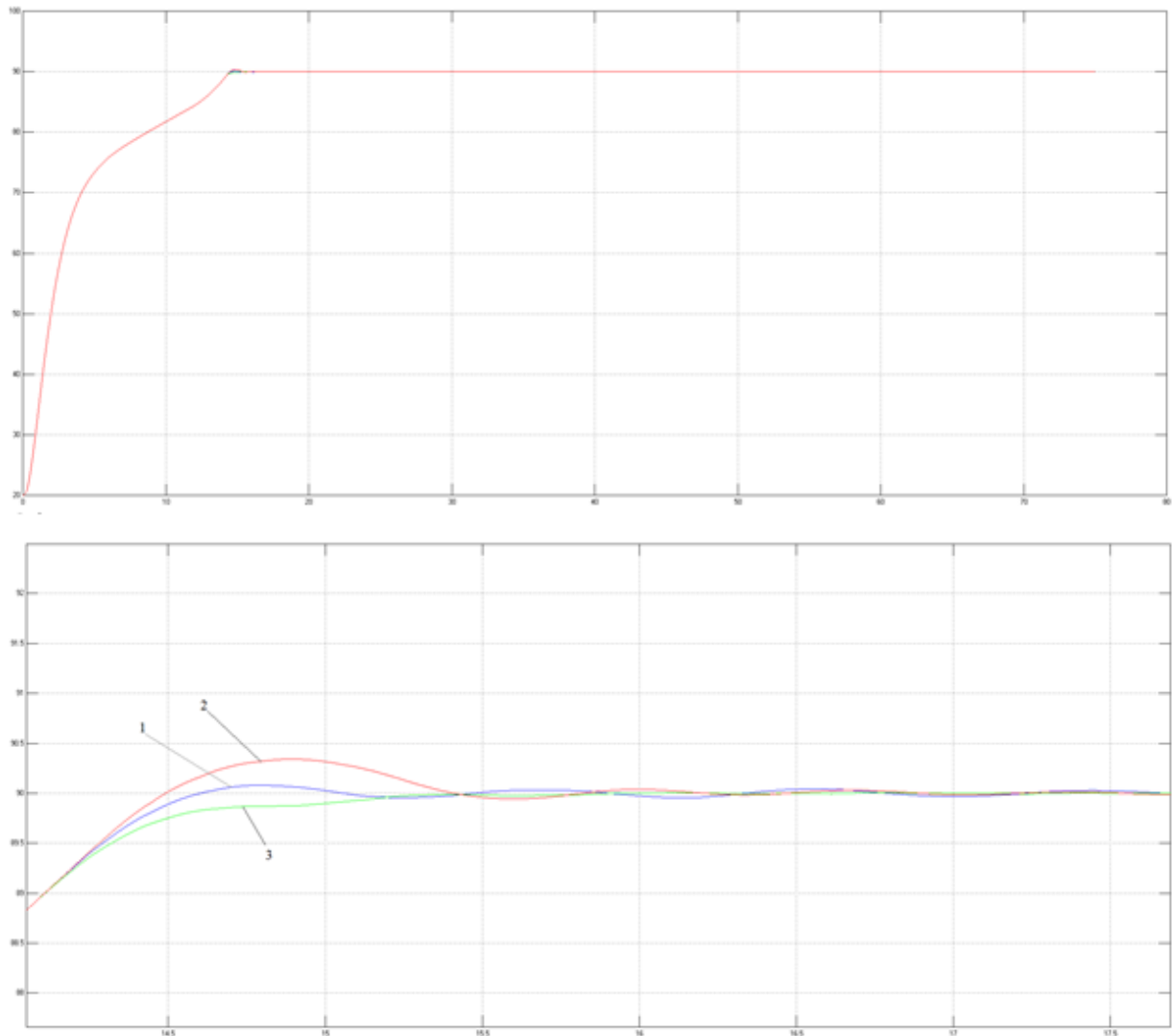


Рис. 3.39 – Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес у САУ з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором за алгоритмом Сугену 3 - перехідний процес у САУ з регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж.

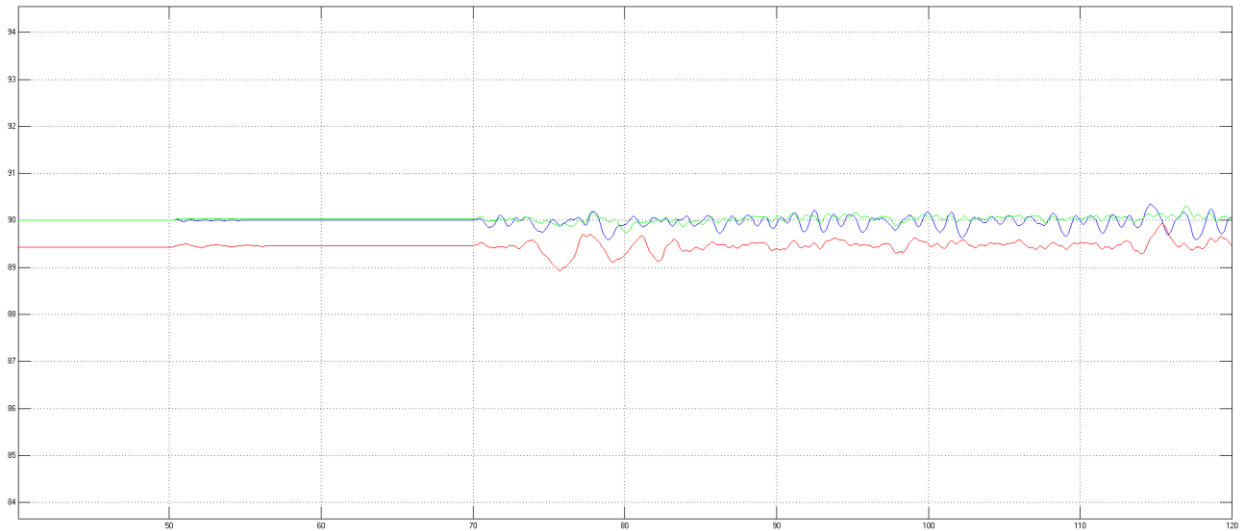


Рис. 3.40 – Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання різних САУ при детермінованих і випадкових складових впливу, що збурює, графік 1 – перехідний процес у САУ з традиційним ПІД-регулятором; графік 2 – перехідний процес у САУ з нечітким регулятором за алгоритмом Сугену 3 - перехідний процес у САУ з регулятором, побудованим на базі штучних нейронних мереж.

3.8. Параметрична оптимізація САУ з нейрорегулятором.

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 3.41.

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, а також оптимальні визначені ваги між-нейронних з'єднань першого шару нейронної мережі. Графіки відповідних

перехідних процесів та значення вагових коефіцієнтів представлені у відповідному вікні результатів оптимізації, представленою рисунках 3.42, 3.43 та 3.44. На рисунку 3.44 представлений результат оптимізації, який був отриманий при декількох попередніх процесах оптимізації при визначеному інтегральному критерії якості роботи системи.

Таким чином вдалося 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 $\pm 20\%$.

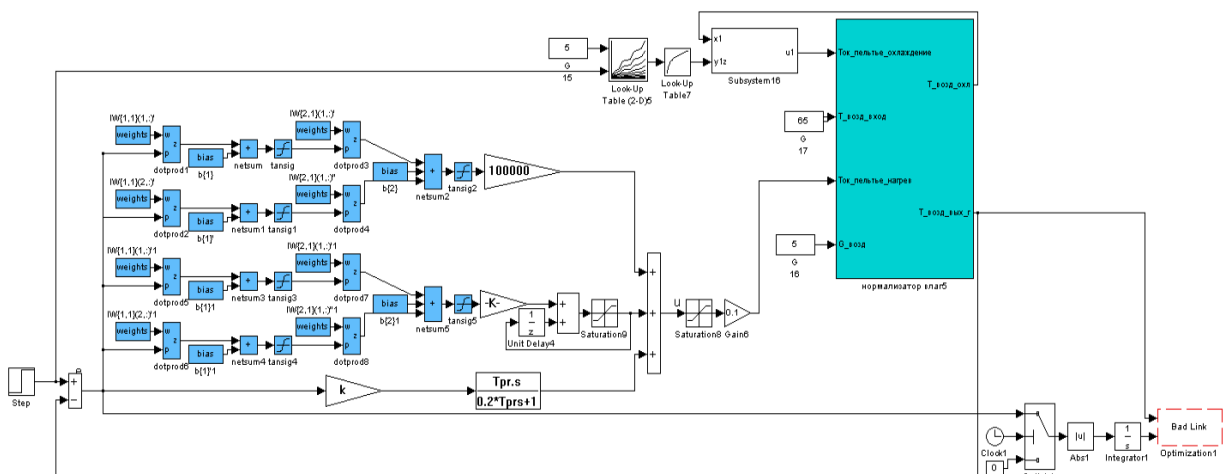
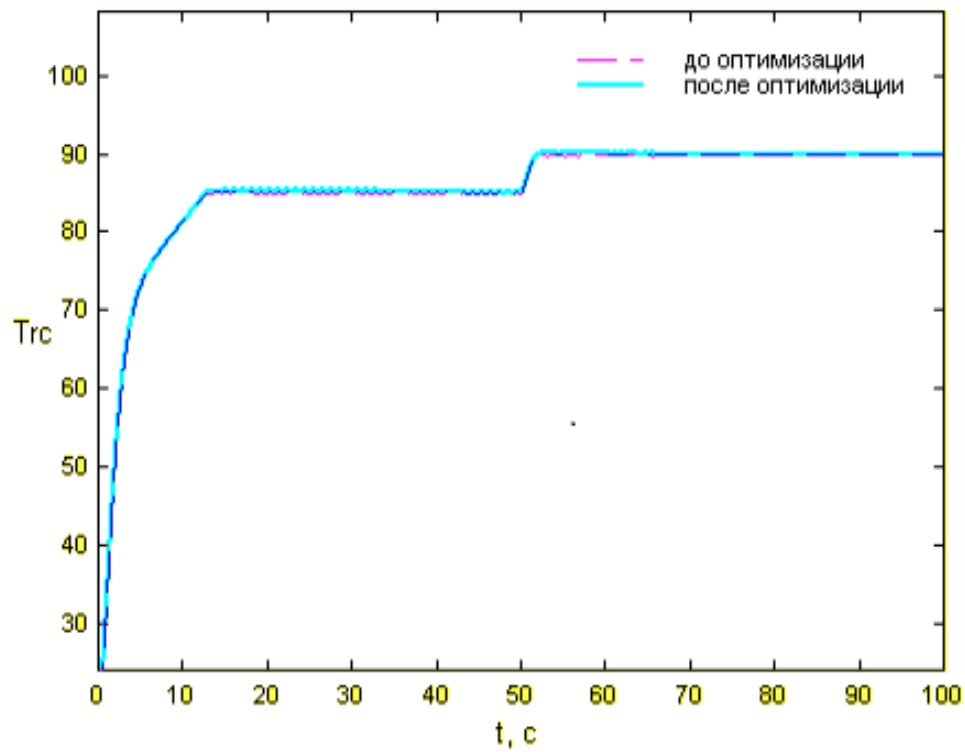
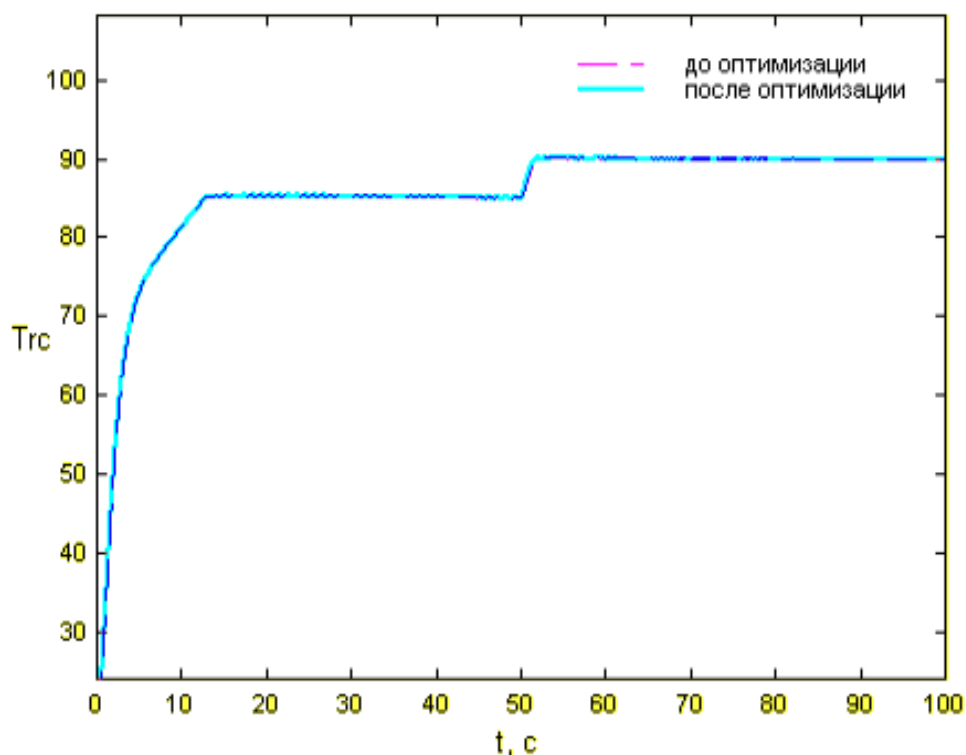


Рис. 3.41 – модель САУ з нейрорегулятором і параметричним оптимізатором



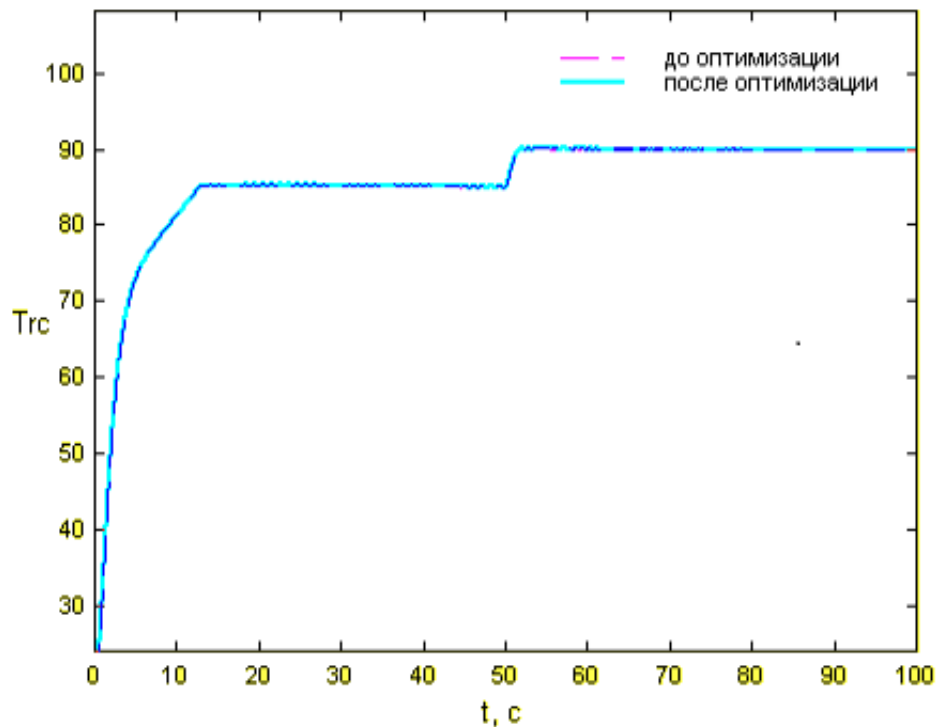
Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
b1	0.055868	-10.055	799231680146479 10	10	до - 14.5073
b2	0.058347	-10.058	534221425181887 10	10	после - 6.2809
b3	-0.17111	-100.171	121338844080722 10	10	оптимизации.
b4	-0.55783	-100.557	409891156867175 10	10	Количество шагов
b5	-0.59497	-100.589	55964847116915 10	10	процедуры оптимизации:
b6	-0.056455	-100.056	8084727798679145 10	10	максимальное - 1500
					фактическое - 181

Рис. 3.42 – оптимізація вагових коефіцієнтів між нейронних з'єднань вихідного шару нейронної мережі.



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
w1	0.0012475	-10.001	188893681814327110	327110	до - 6.2935
w2	0.0075085	-10.007	477885273193885110	3885110	после - 5.4626
w3	3.1803	-103.18	01855511070038	10	оптимизации.
w4	-0.10371	-10-0.10	37526922498338	10	Количество шагов
					процедуры оптимизации:
					максимальное - 1500
					фактическое - 93

Рис. 3.43 – результати оптимізації вагових коефіцієнтів П-складової.



Имя переменной	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
w11	-0.018579	-100.01	357683389088	851310	до - 5.4621
w22	-0.018846	-100.01	384539698616	409210	после - 5.3785
w33	1.0313	-101.03	123370388120	78 10	оптимизации.
w44	-1.0846	-101.08	449628870342	11 10	Количество шагов
					процедуры оптимизации:
					максимальное - 1500
					фактическое - 139

Рис. 3.44 – результати оптимізації вагових коефіцієнтів І-складової

Таким чином, після параметричної оптимізації була перевірена система на грубість для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора САУ. Результати перевірки системи на грубість за допомогою відповідного програмного забезпечення, вбудованого в середовище MATLAB\Simulink, представлені на рисунку 3.45. З рисунку 3.45 можливо побачити, що система не втрачає стійкість при різних параметрах у діапазоні $\pm 20\%$, які відзначені у тому ж вікні перевірки системи на грубість. Отже синтезований нейрорегулятор можливо перетворити у відповідний код – програму для визначеного промислового контролера для практичного застосування його у відповідній системі керування.

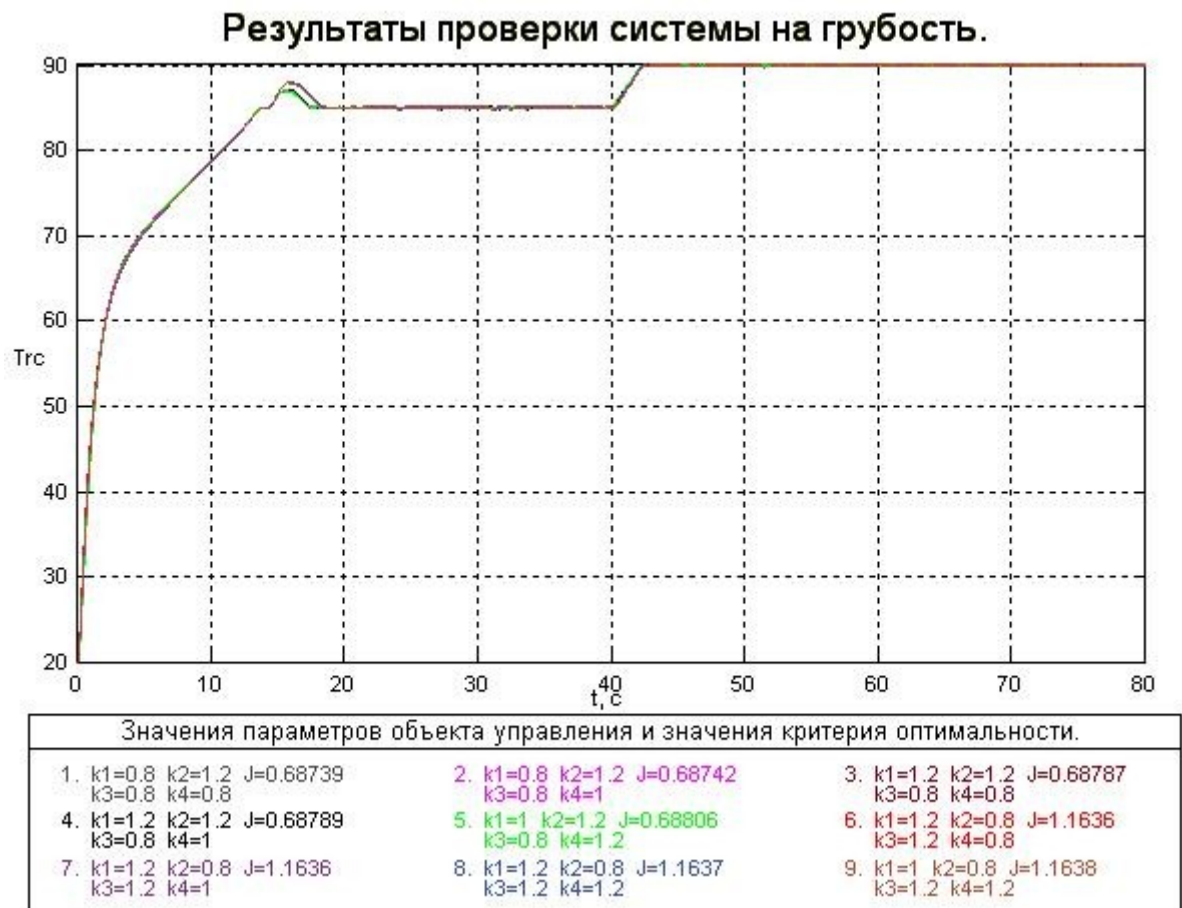


Рис. 3.45 – Вікно результатів перевірки системи управління з нейрорегулятором на грубість

3.9. Аналіз функціонування різних САУ за якістю регулювання за умов впливів, що збурюють, випадкового характеру.

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 3.47. Також у результаті моделювання були отримані відповідні графіки перехідних процесів при детермінованих та випадкових впливах, що збурюють, які відображені на рисунку 3.48. З графіків перехідних процесів можливо побачити, що час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування приблизно однаковий, а при випадкових впливах, що збурюють, різниця в якості регулювання різних САУ практично непомітна. Схема моделювання для порівняльного аналізу функціонування різних САУ за якістю регулювання

представлена на рис 3.46.

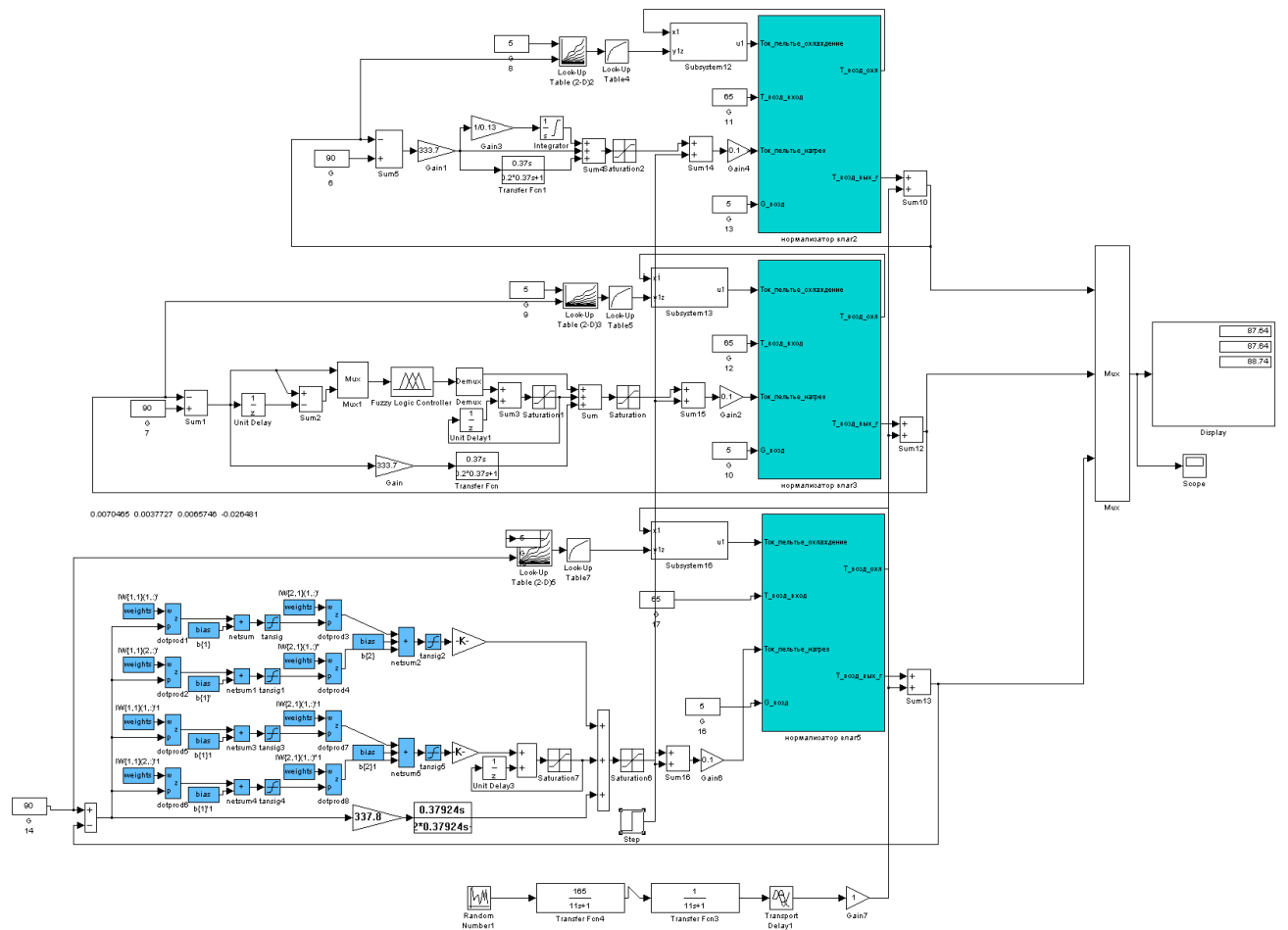


Рис. 3.46 – Схема моделювання для порівняльного аналізу функціонування різних САУ за якістю регулювання

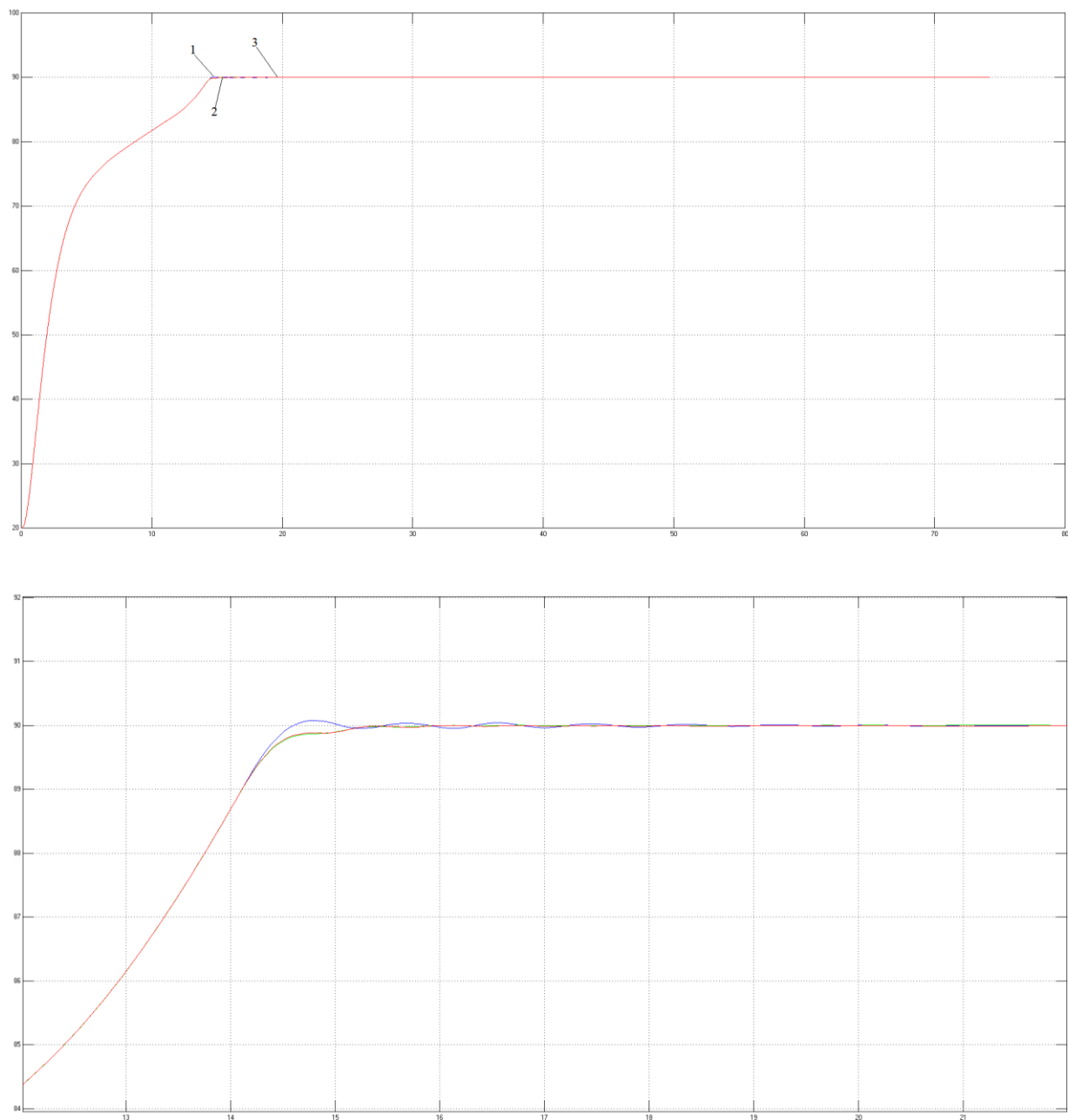


Рис. 3.47 – Графіки перехідних процесів, отриманих в результаті моделювання різних САУ, графік 1 – перехідний процес в САУ з традиційним ПД-регулятором; графік 2 – перехідний процес в САУ з нечітким регулятором; графік 3 – перехідний процес в САУ з регулятором, побудованим на базі штучної нейронної мережі;

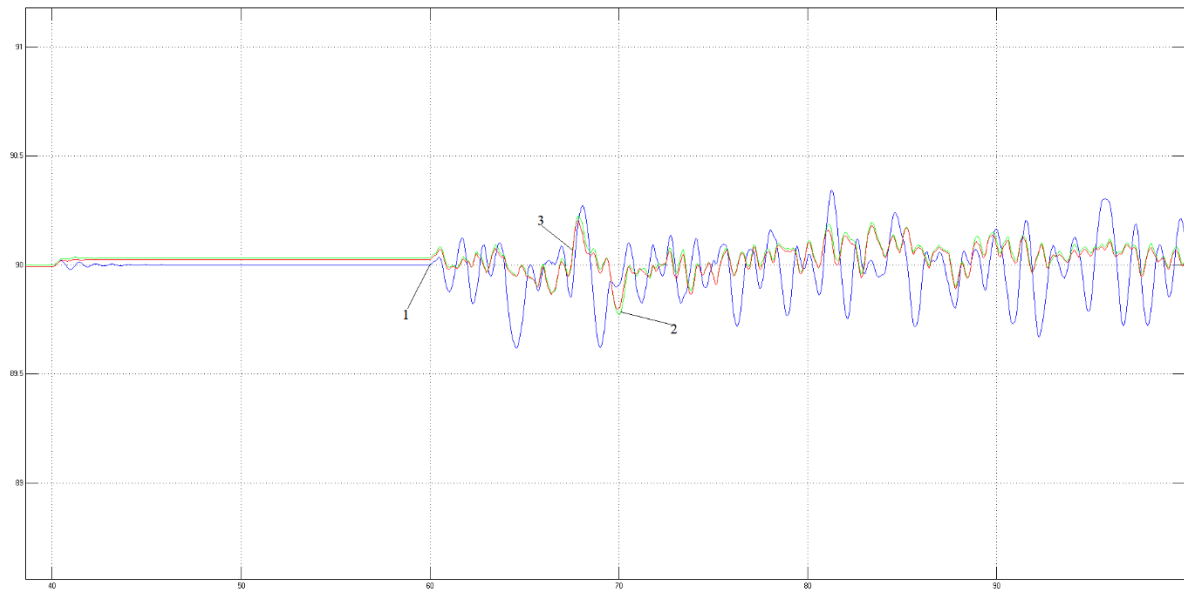


Рис. 3.48 – Графіки перехідних процесів, отриманих в результаті моделювання різних САУ при детермінованих та випадкових складових впливу, що збурює, графік 1 – перехідний процес в САУ з традиційним ПІД-регулятором; графік 2 – перехідний процес в САУ з нечітким регулятором; графік 3 – перехідний процес в САУ з регулятором побудованим 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 3.49, у якому зображене вікно результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень похибки регулювання при різних САУ.

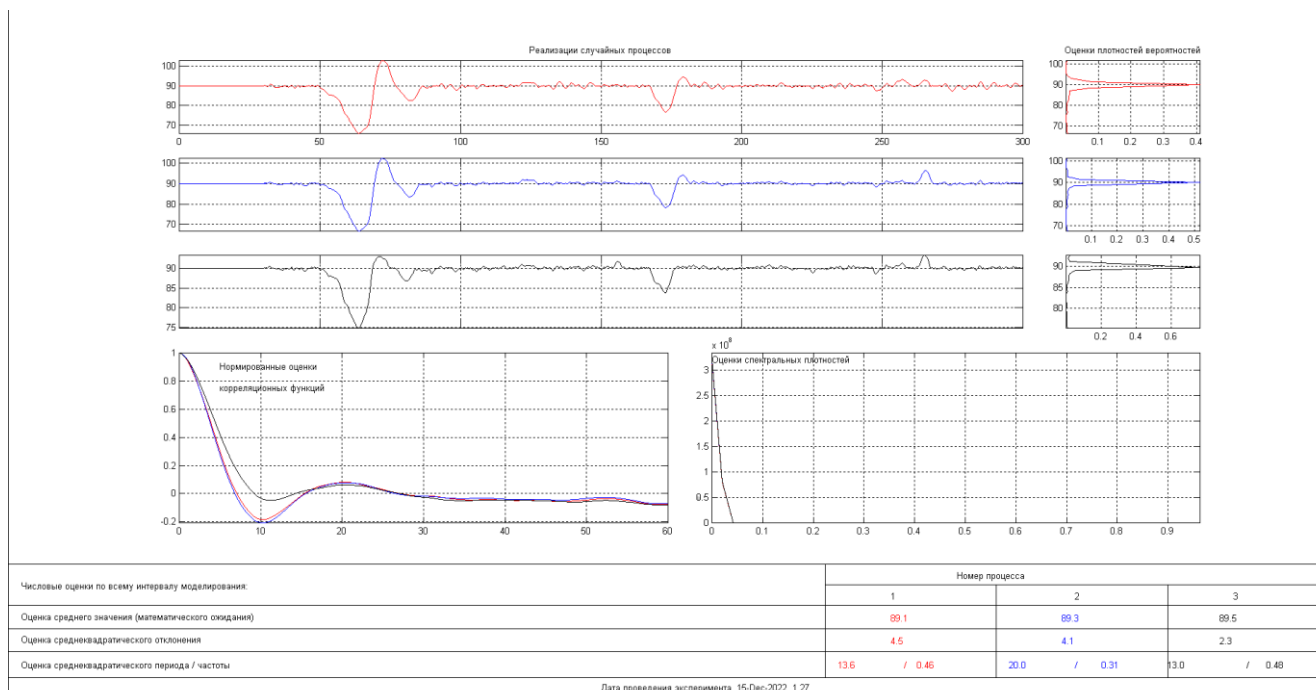


Рис. 3.49 – Вікно результатів аналізу аналізатора імовірнісних характеристик

З рисунку 3.49 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 3.5.

З таблиці 3.5 можливо зробити остаточний висновок, що за якістю регулювання САУ з нейронним регулятором незначно краще функціонує, ніж інші розглянуті САУ. САУ з традиційним ПД-регулятором і САУ з нечітким регулятором функціонують за якістю регулювання практично ідентично при об'єкті з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

САУ	САУ з традиційним	САУ з нечітким	САУ з регулятором,
-----	----------------------	-------------------	-----------------------

	ПД-регулятором	регулятором	представленим штучною нейронною мережею
Час регулювання	≈ 15	≈ 15	≈ 15
Максимальне динамічне відхилення	$\approx 0,1$	$\approx 0,09$	$\approx 0,05$
Інтегральний показник	178	167,8	170,9
Середнє квадратичне відхилення	4,5	4,1	2,3

Таблиця 3.5 – Показники якості регулювання різних САУ

3.10. Розробка програмного забезпечення для реалізації нейрорегулятора на базі промислового контролера.

За допомогою Simulink PLC Coder автоматично одержуємо згенерований код для промислових систем управління. А саме, згенерований вихідний код у структурованому текстовому форматі з моделі Simulink. Для генерації коду необхідна програма Matlab, починаючи з версії 2010a. Розробляти необхідно програму для ПЛК Siemens SIMATIC STEP 7.

Спочатку вибираємо Subsystem Parameters на блоці регулятора, синтезованого на основі штучної нейронної мережі. У цьому вікні відзначаємо «Treat as atomic unit» і натискаємо кнопку ОК. На функціональному блоці натискаємо праву клавішу миші і вибираємо PLC Coder / Options. Далі вибираємо, у який тип ПЛК буде згенерований код (Target IDE) і натискаємо клавішу Generate code. Згенерований код для SIMATIC STEP 7 наступний:

```
(*
*
* File: sravneniev222.scl
```

*
* IEC 61131-3 Structured Text (ST) code generated for subsystem
"sravneniev222/Neuro regulator Dimona"

*
* Model name : sravneniev222
* Model version : 1.2
* Model creator : Dmytro
* Model last modified by : Dmytro
* Model last modified on : Tue Dec 13 20:37:17 2022
* Model sample time : 0.001s
* Subsystem name : sravneniev222/Neuro regulator Dimona
* Subsystem sample time : 1.1s
* Simulink PLC Coder version : 3.7 (R2022b) 13-May-2022
* ST code generated on : Tue Dec 13 20:52:27 2022

*
* Target IDE selection : Siemens SIMATIC Step 7
* Test Bench included : No

*
*)

FUNCTION_BLOCK Neuro

VAR_INPUT

ssMethodType: INT;

Y: REAL;

Y_k: REAL;

END_VAR

VAR_OUTPUT

u: REAL;

END_VAR

VAR

b_DiscreteTransferFc: REAL;

UnitDelay_DSTATE: REAL;

rtb_Sum10: REAL;

rtbZZ13: REAL;

```

rtb_Product_g: REAL;
DiscreteTransferFcnv: REAL;
temp1: REAL;
temp2: REAL;
temp3: REAL;
temp4: REAL;
END_VAR
CASE ssMethodType OF
  0:
    (* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/Neuro regulator Dimona' *)
    (* InitializeConditions for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn' *)
    b_DiscreteTransferFc := 0.0;
    (* InitializeConditions for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay' *)
    UnitDelay_DSTATE := 61.0;
    (* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/Neuro regulator Dimona' *)
  1:
    (* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Neuro regulator Dimona' *)
    (* Sum: '<S1>/Sum7' *)
    rtb_Sum10 := Y_k - Y;
    (* DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn' incorporates:
    * Gain: '<S1>/o_ЯНЯР13' *)
    DiscreteTransferFcnv := ((337.8834 * rtb_Sum10) - b_DiscreteTransferFc) /
0.0760000000000000012;
    (* Sum: '<S16>/Sum' incorporates:
    * Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,;)"
    * Product: '<S16>/Product' *)
    rtb_Product_g := 0.0012474 * rtb_Sum10;
    (* Product: '<S17>/Product' incorporates:
    * Constant: '<S1>/IW{1,1}(2,;)" *)
    rtbZZ13 := 0.007495 * rtb_Sum10;
    (* Sum: '<S1>/Sum10' incorporates:
    * Constant: '<S12>/one'
    * Constant: '<S12>/one1'

```

- * Constant: '<S13>/one'
- * Constant: '<S13>/one1'
- * Constant: '<S15>/one'
- * Constant: '<S15>/one1'
- * Constant: '<S1>/IW{1,1}(1,:)1'
- * Constant: '<S1>/IW{1,1}(2,:)1'
- * Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)1'
- * Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)1'
- * Gain: '<S12>/Gain'
- * Gain: '<S12>/Gain1'
- * Gain: '<S13>/Gain'
- * Gain: '<S13>/Gain1'
- * Gain: '<S15>/Gain'
- * Gain: '<S15>/Gain1'
- * Gain: '<S1>/o_ЯНЯР15'
- * Math: '<S12>/Math Function'
- * Math: '<S12>/Math Function1'
- * Math: '<S13>/Math Function'
- * Math: '<S13>/Math Function1'
- * Math: '<S15>/Math Function'
- * Math: '<S15>/Math Function1'
- * Product: '<S20>/Product'
- * Product: '<S21>/Product'
- * Product: '<S22>/Product'
- * Product: '<S23>/Product'
- * Sum: '<S12>/Sum'
- * Sum: '<S12>/Sum1'
- * Sum: '<S13>/Sum'
- * Sum: '<S13>/Sum1'
- * Sum: '<S15>/Sum'
- * Sum: '<S15>/Sum1'
- * Sum: '<S1>/netsum3'
- * Sum: '<S1>/netsum4'

```

* Sum: '<S1>/netsum5'
* UnitDelay: '<S1>/Unit Delay'
*
* About '<S12>/Math Function':
* Operator: exp
*
* About '<S12>/Math Function1':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S13>/Math Function':
* Operator: exp
*
* About '<S13>/Math Function1':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S15>/Math Function':
* Operator: exp
*
* About '<S15>/Math Function1':
* Operator: reciprocal *)
temp1 := EXP((( -0.018579 * rtb_Sum10) - 0.018579) * -2.0);
temp2 := EXP((( -0.018846 * rtb_Sum10) - 0.018846) * -2.0);
rtb_Sum10 := (((1.0 / (EXP((((1.0 / (temp1 + 1.0)) * 2.0) - 1.0) * 1.0313) -
0.055903) + (((1.0 / (temp2 + 1.0)
) * 2.0) - 1.0) * -1.0846))) * -2.0) + 1.0)) * 2.0) - 1.0) * 10000.0) +
UnitDelay_DSTATE;
(* Saturate: '<S1>/Saturation7' *)
IF rtb_Sum10 > 100.0 THEN
    rtb_Sum10 := 100.0;
ELSIF rtb_Sum10 < 0.0 THEN
    rtb_Sum10 := 0.0;
END_IF;
(* End of Saturate: '<S1>/Saturation7' *)

```

(* Sum: '<S1>/Sum8' incorporates:

- * Constant: '<S10>/one'
- * Constant: '<S10>/one1'
- * Constant: '<S11>/one'
- * Constant: '<S11>/one1'
- * Constant: '<S14>/one'
- * Constant: '<S14>/one1'
- * Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)"
- * Constant: '<S1>/IW{2,1}(1,:)"'
- * Constant: '<S1>/b{1}'
- * Constant: '<S1>/b{1}"
- * DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn'
- * Gain: '<S10>/Gain'
- * Gain: '<S10>/Gain1'
- * Gain: '<S11>/Gain'
- * Gain: '<S11>/Gain1'
- * Gain: '<S14>/Gain'
- * Gain: '<S14>/Gain1'
- * Gain: '<S1>/o_ЯНЯР14'
- * Math: '<S10>/Math Function'
- * Math: '<S10>/Math Function1'
- * Math: '<S11>/Math Function'
- * Math: '<S11>/Math Function1'
- * Math: '<S14>/Math Function'
- * Math: '<S14>/Math Function1'
- * Product: '<S18>/Product'
- * Product: '<S19>/Product'
- * Sum: '<S10>/Sum'
- * Sum: '<S10>/Sum1'
- * Sum: '<S11>/Sum'
- * Sum: '<S11>/Sum1'
- * Sum: '<S14>/Sum'

```

* Sum: '<S14>/Sum1'
* Sum: '<S17>/Sum'
* Sum: '<S1>/netsum'
* Sum: '<S1>/netsum1'
* Sum: '<S1>/netsum2'
*
* About '<S10>/Math Function':
* Operator: exp
*
* About '<S10>/Math Function1':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S11>/Math Function':
* Operator: exp
*
* About '<S11>/Math Function1':
* Operator: reciprocal
*
* About '<S14>/Math Function':
* Operator: exp
*
* About '<S14>/Math Function1':
* Operator: reciprocal *)
temp3 := EXP((rtb_Product_g + 0.05596) * -2.0);
temp4 := EXP((rtbZZ13 + 0.060303) * -2.0);
rtb_Product_g := (((((1.0 / (EXP((((((1.0 / (temp3 + 1.0)) * 2.0) - 1.0) * 3.1803)
- 0.17092) + (((1.0 / (temp4 + 1.0)
) * 2.0) - 1.0) * -0.10384)) * -2.0) + 1.0)) * 2.0) - 1.0) * 100000.0) + rtb_Sum10)
+ (0.38 * DiscreteTransferFcnv)
;
(* Saturate: '<S1>/Saturation6' *)
IF rtb_Product_g > 100.0 THEN
    rtb_Product_g := 100.0;

```

```

ELSIF rtb_Product_g < 0.0 THEN
    rtb_Product_g := 0.0;
END_IF;
(* End of Saturate: '<S1>/Saturation6' *)

(* Update for DiscreteTransferFcn: '<S1>/Discrete Transfer Fcn' *)
b_DiscreteTransferFc := DiscreteTransferFcnv;
(* Update for UnitDelay: '<S1>/Unit Delay' *)
UnitDelay_DSTATE := rtb_Sum10;
(* Outport: '<Root>/u' incorporates:
    * Gain: '<S1>/Gain6' *)
u := 0.12 * rtb_Product_g;
(* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Neuro regulator Dimona' *)
END_CASE;
END_FUNCTION_BLOCK

```

3.11. Висновки за розділом.

В процесі виконання роботи була розроблена модель САР 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 САР функціонує можливо трішки краще, ніж САР з традиційним ПІД-регулятором при об'єкті управління з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Для подальшої реалізації параметричної оптимізації САР за характеристиками нечіткого регулятора було виконано тренування визначеної штучної нейронної мережі, яка може виконувати роль нейрорегулятора. Була розроблена модель САР з регулятором, що є штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація САР з нейрорегулятором була проведена за тих же умов, що і САР з традиційним ПІД-регулятором.

У результаті моделювання різних САР було встановлено, що за якістю регулювання САР з нейрорегулятором функціонує незначно краще, ніж інші САР, це за інтегральним показником якості регулювання відповідно 170,9 при САР з нейрорегулятором і 178 при САР з традиційним ПД-регулятором. Середнє квадратичне відхилення регульованої зміни від заданого значення, при випадкових впливах, що збурюють, відрізняється: при САР з традиційним ПД-регулятором 4,5 а при САР з нейрорегулятором 2,3.

Таким чином, на основі виконаного синтезу і аналізу різних САР 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. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА САК ПРОЦЕСОМ ГАРЯЧОГО КОПЧЕННЯ КОВБАС, ЩО РЕАЛІЗУЄ ФУНКЦІЮ МАКСИМІЗАЦІЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРИ ГАРАНТУВАННІ ДОТРИМАННЯ ОБМЕЖЕНЬ ПО ТЕМПЕРАТУРІ

4.1. Обґрунтування актуальності додаткової функції гарантування дотримання обмежень температури на виході з реактора САК процесом гарячого копчення ковбас для підвищення продуктивності.

Найчастіше на змінні об'єкта керування (ОК) регламентами накладаються обмеження, порушення яких може мати дуже несприятливі наслідки. Вони можуть призводити до аварійних зупинок обладнання, втрат сировини та енергоносіїв, зниження якості продукції, необхідність мати великий штаб персоналу та ремонтних служб. Для процесу гарячого копчення ковбас такою є температура $T_{\text{гнв}}$.

В даному випадку на температуру продукту на виході з реактору регламентом накладаються обмеження від 20°C до 32°C . Такі значення зумовлені особливостями перебігу каталітичної реакції.

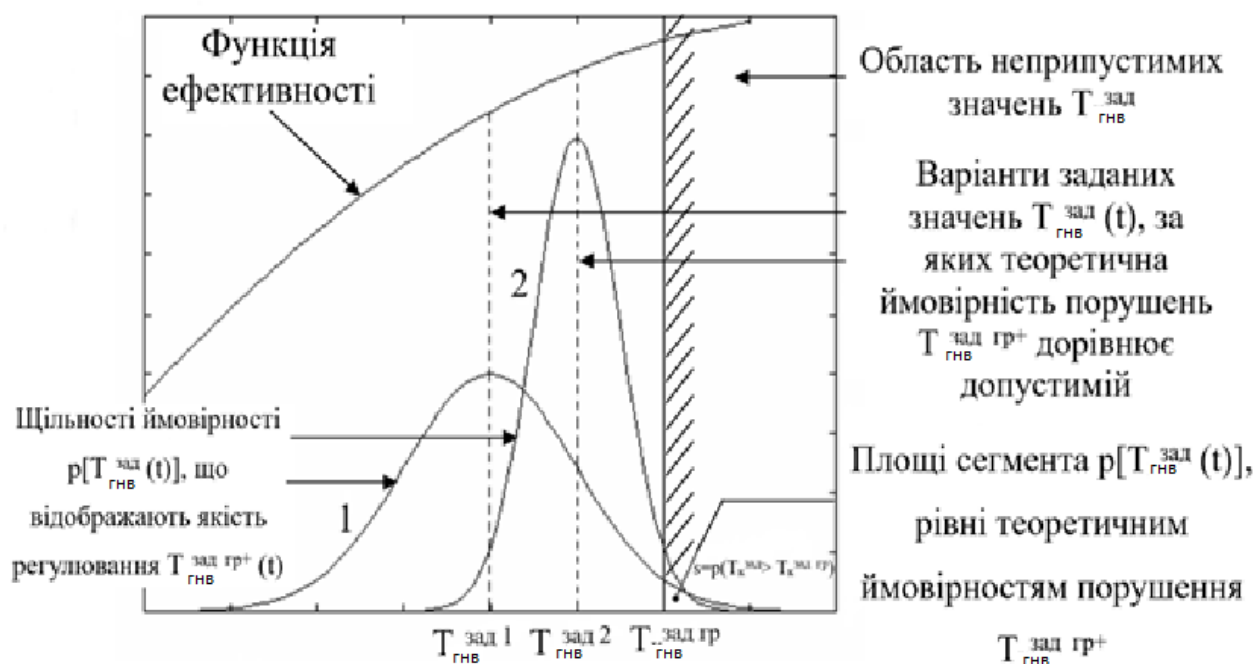


Рис. 4.1 – Функція ефективності процесу гарячого копчення ковбас

Оскільки ОК є суттєво нелінійним, має запізнення в каналах керування,

схильний до впливу різного типу збурень задане значення температури $T_{гнв}$ для САР базової структури необхідно встановлювати на рівні, суттєво віддаленому від верхньої межі 32°C . Недоліком даної системи є низька ефективність роботи ОК при цьому гарантувати невихід за межу не можливо. В свою чергу впровадження системи гарантуючого керування (СГК) дозволить одночасно з функціями регулювання реалізувати функцію гарантованого дотримання встановлених обмежень з наперед заданою ймовірністю і працювати з максимально можливою продуктивністю. Вологість димоповітряної суміші регулюється шляхом переохолодження до точки роси. Надмірна кількість вологи може призводити до погіршення якості ковбасних виробів, навіть до повного псування продукту: погіршується зовнішній вигляд, колір, цілісність оболонки, смак та аромат. Але надмірне переохолодження не є доцільним з економічної точки зору. Тому варто створити систему, яка забезпечить максимальне наближення до верхньої межі переохолодження, але водночас гарантуватиме, що значення температури $T_{гнв}$ не перетинатиме верхнє гранично допустиме обмеження.

4.2. Вибір і опис принципу реалізації функції гарантування дотримання обмежень температури $T_{гнв}$.

Концепція побудови таких систем полягає у безперервному оцінюванні (на ковзному інтервалі часу) поточного значення ймовірності відсутності порушення та такого коригування режиму роботи об'єкта, щоб ця ймовірність відповідала наперед заданій ймовірності. Безпосередньо вимірювати значення цієї ймовірності неможливо, тому необхідна розробка спеціальної моделі, яка дозволить за оцінками доступних для вимірювання змінних отримати необхідну оцінку. Таку модель можна назвати моделлю порушення регламенту (МНР).

Оцінювати (прямо чи опосередковано) поточне значення ймовірності відсутності порушення $\hat{P}_{\bar{S}}(y^{rp\pm}, T, t)$, тобто відсутності події $S = \bar{S}$, можливо, якщо для процесу $y(t)$ і потоку подій $S(t)$ можуть бути прийняті наступні моделі (гіпотези):

- регульована змінна $y(t)$ може розглядатися як випадковий процес і має

дві адитивні складові:

$$y(t) = m_y(t) + \tilde{y}^0(t), \quad (4.1)$$

де $m_y(t)$ – математичне очікування $y(t)$;

$\tilde{y}^0$ – центрований випадковий процес, що володіє властивостями диференційності, нормальності та квазістаціонарності на $T \gg T_{\text{кст}}$;

$T_{\text{кст}}$ – мінімальний інтервал часу, де виконується умова квазістаціонарності $\tilde{y}^0(t)$.

• потік подій $S(t)$ є пуассонівським, тобто ймовірність події $\bar{S}$ (відсутності S) визначається з виразу:

$$P_{\bar{S}}(y^{\text{rp}\pm}, T) = \exp\{-n_S(y^{\text{rp}\pm})T\} = \exp\{N_S(y^{\text{rp}\pm}, T)\}, \quad (4.2)$$

де $n_S(y^{\text{rp}\pm})$ – середня частота (інтенсивність) порушень у обмежень $y^{\text{rp}\pm}$ на T ;

$N_S(y^{\text{rp}\pm}, T)$ – загальна кількість подій S на T .

Гіпотеза (4.1) є "класичною" для завдань керування і, як показує практика, добре виконується для великої кількості, якщо не більшості об'єктів. Вона дає можливість використовувати як математичну основу МПР (модель порушення регламенту) теорію викидів випадкових процесів. Гіпотеза (4.2) застосовна, якщо події S є незалежними (рідкісними), тобто. середній період їх появи значно більший за інтервал кореляції $y(t)$. Ця умова апріорі виконується, оскільки тільки для рідкісних S має сенс функціонування об'єкта керування.

Розглянемо варіанти МПР, найбільш актуальні для завдань, що ми розглядаємо. Вони представлені у формі виразів для розрахунку поточних значень оцінок середньої інтенсивності подій S , тобто $\hat{n}_S(y^{\text{rp}\pm}, T)$. Вихідною інформацією цих розрахунків є результати оцінювання імовірнісних характеристик процесу $y(t)$ і значення $y^{\text{rp}\pm}$. Вигляд МПР залежить від прийнятої моделі зміни $y(t)$ і, конкретно, від виду прийнятої моделі зміни $m_y(t)$:

а) $m_y(t)$ квазістаціонарна (практично постійна) на $T_{\text{кст}}$ функція часу, тобто $m_y(t) = m_y = \text{const} \forall t \in T_{\text{кст}}$ –

$$\hat{n}^{\pm}(y^{\text{rp}\pm}, t) = \exp\left\{-\frac{\hat{\sigma}_y}{2\pi\hat{\sigma}_y} \exp\left\{-\frac{y^{\text{rp}\pm} - \hat{m}_y}{2\hat{\sigma}_y^2}\right\}\right\}; \quad (4.3)$$

б) $m_y(t)$ є сумою постійної та гармонійної (з випадковою початковою

фазою) функцій часу квазістаціонарних на $T_{кст}$, тобто $m_y(t) = m_y + A_y(\sin \omega_y t + \varphi_y)$,

$$\varphi_y \in \{-\pi; \pi\} -$$

$$\begin{aligned} \hat{n}^{\pm}(y^{rp\pm}, t) = & \frac{\hat{\sigma}_{\dot{y}} 1 \hat{\omega}_y}{2\pi \hat{\sigma}_y} \int_{-\pi}^{\pi} \Phi' \left(\frac{y^{rp\pm} - \hat{m}_y - \hat{A}_y \cos \psi_y}{\hat{\sigma}_{y1}} \right) \times \\ & \times \left\{ \Phi' \left(\frac{\hat{\omega}_y \hat{A}_y}{\hat{\sigma}_{y1}} \sin(\hat{\omega}_y t + \hat{\varphi}_y) + \frac{\hat{\omega}_y \hat{A}_y}{\hat{\sigma}_{y1}} \sin \psi_y \right) \Phi \left(\frac{\hat{\omega}_y \hat{A}_y}{\hat{\sigma}_{y1}} \sin \psi_y \right) \right\} d\psi_y; \end{aligned} \quad (4.4)$$

в) $m_y(t)$ є апіорі невідомою функцією часу –

$$\begin{aligned} \hat{n}_s^{\pm}(y^{rp\pm}, t) = & \frac{\hat{\sigma}_{\dot{y}}}{2\pi \hat{\sigma}_y} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \text{sign} \Delta y^{\pm} \left[\frac{y^{rp\pm} - \hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \right]^2 \right\} \times \\ & \times \left\{ \exp \left(-\frac{\hat{m}_{\dot{y}}(t)}{2\hat{\sigma}_{\dot{y}}} \right) \mp \sqrt{2\pi} \frac{\hat{m}_{\dot{y}}(t)}{\hat{\sigma}_{\dot{y}}(t)} \Phi \left(\mp \frac{\hat{m}_{\dot{y}}(t)}{\hat{\sigma}_{\dot{y}}} \right) \right\}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

де $\Phi(\dots) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp \left\{ -\frac{1}{2} z^2 \right\} dz$, $\Phi'(\dots) = \frac{1}{2\pi} \exp \left\{ -\frac{1}{2} z^2 \right\}$ – інтеграл

ймовірності та його похідна;

$\hat{m}_y, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_{\dot{y}}, \hat{A}_y, \hat{\omega}_y$ – оцінки відповідних характеристик випадкових процесів, що обчислюються на ковзному інтервалі часу $T_{кст}$;

$\hat{m}_y(t), \hat{m}_{\dot{y}}(t)$ – оцінки математичного очікування, що змінюється, і його першої похідної, що обчислюються на ковзному інтервалі часу $T_m \ll T_{кст}$.

Оцінки характеристик випадкових процесів, що обчислюються в реальному часі на ковзних інтервалах, визначаються усередненням на $T_{кст}$ (або на $T_m \ll T_{кст}$ для $m(t)$). При усередненні з рівномірним зважуванням реалізуються такі вирази:

$$\begin{aligned} \hat{m}_y = & \frac{1}{T} \int_t^{t+T} y(t) dt, \quad \hat{m}_{\dot{y}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \dot{y}(t) dt, \quad \hat{m}_y(t) = \frac{1}{T_m} \int_t^{t+T_m} y(t) dt, \\ \hat{m}_{\dot{y}} = & \frac{1}{T_m} \int_t^{t+T_m} \dot{y}(t) dt; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_y = & \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (y(t) - \hat{m}_y)^2 dt, \quad \hat{\sigma}_{\dot{y}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (\dot{y}(t) - \hat{m}_{\dot{y}})^2 dt, \\ (4.6) \end{aligned}$$

$$\hat{\mu}_y^4 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (y(t) - \hat{m}_y)^4 dt, \quad \hat{\mu}_{\dot{y}}^4 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} (\dot{y}(t) - \hat{m}_{\dot{y}})^4 dt.$$

Для розрахунків (3.4) необхідні оцінки можуть бути обчислені з наступних співвідношень:

$$\hat{\sigma}_{y1}^2 = \hat{\sigma}_y^2 - \sqrt{2 \left(\hat{\sigma}_y^4 - \frac{1}{3} \hat{\mu}_y^4 \right)} = \hat{\sigma}_y^2 - \frac{\hat{A}_y^2}{2}; \quad \hat{\sigma}_{y1}^2 = \hat{\sigma}_y^2 - \sqrt{2 \left(\hat{\sigma}_y^4 - \frac{1}{3} \hat{\mu}_y^4 \right)} = \hat{\sigma}_y^2 - \frac{\hat{A}_y^2}{2},$$

$$\hat{A}_y = \sqrt{2 \left(\hat{\sigma}_y^4 - \frac{1}{3} \hat{\mu}_y^4 \right)}; \quad \hat{A}_y = \sqrt{2 \left(\hat{\sigma}_y^4 - \frac{1}{3} \hat{\mu}_y^4 \right)}; \quad \hat{\omega}_y = \hat{A}_y / \hat{A}_y, \quad (4.7)$$

де $y_1(t) = y(t) - \hat{A}_y \sin(\omega_y t + \varphi_y)$, $\dot{y}_1(t) = d_{y1}/dt$;

$\hat{\mu}_y^4, \hat{\mu}_{\dot{y}}^4$ – оцінки четвертих центральних моментів $y_c(t)$ на інтервалі Ткст.

Зазначимо, що це оцінки, одержувані по (4.6) і (4.7), є безперервними функціями часу, причому $\hat{m}_y(t)$ найбільш високочастотна їх.

Ефект прогнозування зміни $y(t)$ при зміні $y^{3ДД+}$ і поліпшення динаміки зовнішнього контуру можна отримати використовуючи в модулі оцінки імовірнісних характеристик замість змінної $y(t)$ змінну $\Delta y(t)$. На рисунку цей зв'язок показано пунктирною лінією.

Поліпшення динаміки СГУ можна очікувати також за рахунок визначення $y^{3ДД+}$ у не в замкнутому контурі, а безпосереднім розрахунком. Оскільки змінна $y(t)$ змінюється на околиці $y^{3Д}$, то $m_y \approx y^{3Д} = y^{3ДД}$. Замінивши змінні у виразах (4.3), (4.4), (4.5) і дозволивши їх щодо $y^{3ДД}$ (для (4.4) – використовуючи апроксимацію), отримаємо відповідно:

$$\begin{aligned} \text{а)} \quad y^{3ДД\pm}(t) &= y^{rp\pm} \mp \\ \hat{\sigma}_y \left| \sqrt{2 \left| \ln \left(T \hat{\sigma}_{\dot{y}} / 2\pi \hat{\sigma}_y \ln \left(\frac{1}{P_S^\Gamma(y^{rp\pm}, T)} \right) \right) \right|} \right|; \quad (4.8) \\ \text{б)} \quad y^{3ДД\pm}(t) &= y^{rp\pm} \mp \\ \hat{\sigma}_{y1} \left| \sqrt{2 \left| \ln \left(T \hat{\sigma}_{\dot{y}1} / 2\pi \hat{\sigma}_{y1} \ln \left(\frac{1}{P_S^\Gamma(y^{rp\pm}, T)} \right) \right) \right|} \right| + \\ &+ \left(C_0 - C_1 \frac{\hat{A}_y}{\hat{\sigma}_{y1}} - C_2 \frac{\hat{\omega}_s \hat{\sigma}_y}{\hat{\sigma}_{y1}} + C_3 \frac{2\pi}{\hat{\omega}_y T} \ln \left(\frac{1}{P_S^\Gamma(y^{rp\pm}, T)} \right) \right), \quad (4.9) \end{aligned}$$

де C_0, C_1, C_2, C_3 – константи, що визначаються в результаті вирішення задачі

апроксимації (3.4);

$$y^{3ДД\pm}(t) = y^{гр\pm} \mp$$

$$\hat{\sigma}_y \left| \sqrt{2 \ln \left| \frac{T \hat{\sigma}_y}{2 \pi \hat{\sigma}_y \ln P_s^{\Gamma}(y^{гр\pm}, T)} \exp \left\{ -\frac{\hat{m}_y^2(y)}{2 \hat{\sigma}_y^2} \mp \frac{\sqrt{2 \pi} \hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \Phi \left(\frac{\hat{m}_y(t)}{\hat{\sigma}_y} \right) \right\} \right|} \right|, \quad (4.10)$$

Структурна схема SGK з розрахунком поточного значення $y^{3ДД+}$ за (4.8) ... (4.10) наведена на рис. 4.2.

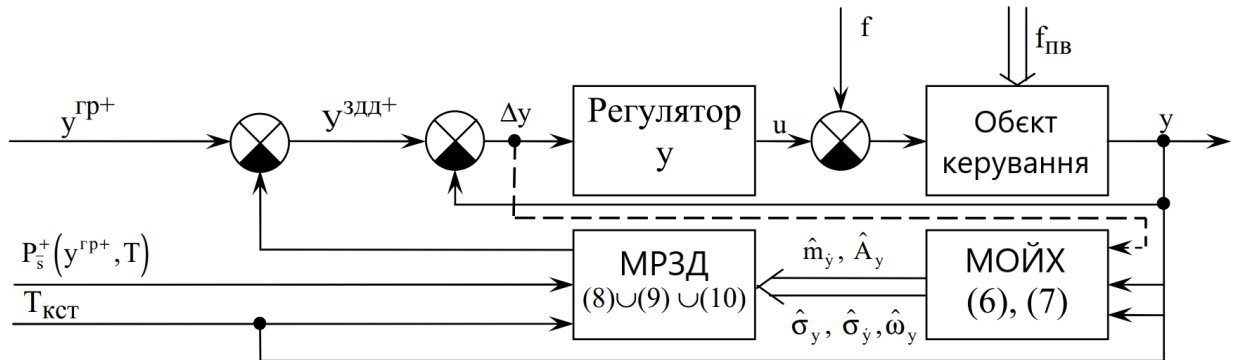


Рис. 4.2. Структурна схема SGK з розрахунком допустимого заданого значення контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту (МРЗД – модуль розрахунку допустимого заданого значення)

4.3. Розробка структурної схеми САК гарантування дотримання обмежень температури $T_{гнв}$.

Як зазначалося раніше, актуальність SGK для процесу гарячого копчення проявляється тоді, коли поставлено задачу максимальної продуктивності та енергоефективності при гарантованому унеможливленні виходу за температурні режими та створенні аварійної ситуації. Задача максимізації продуктивності та енергоефективності вимагає реалізації таких температурних режимів роботи ОК, коли фактичне значення температури $T_{гнв}$ наближається до верхнього гранично-допустимого $T_{гнв}^{гр+}$. Варто зазначити що, хоча незначне перевищення межі не призводить до катастрофічних наслідків, воно все одно є небажаним, оскільки негативно впливає на якість продукту.

На рисунку 4.3 наведено структурну схему SGK, яка забезпечує максимальне наближення фактичного значення регламентної змінної $T_{гнв}$ до її верхнього гранично-допустимого значення $T_{гнв}^{гр+}$. В розробленій системі

використана квазістаціонарна (майже постійна) модель зміни математичного очікування $m_y(t)$ на $T_{\text{кст}}$ (мінімальний інтервал часу, де виконується умова квазістаціонарності) функції часу та принцип побудови SGK з розрахунком допустимого заданого значення температури $T_{\text{гнв}}^{\text{гр}+}$ безпосередньо за моделлю порушення регламенту з використанням виразу 4.8. При реалізації алгоритму гарантування використовувались такі налаштування: гарантована вірогідність дотримання обмежень $P_s^{\text{г}} = 0,99$ на інтервалі часу $T = 50$ сек., інтервал квазістаціонарності $T_{\text{кст}} = 100$ сек.

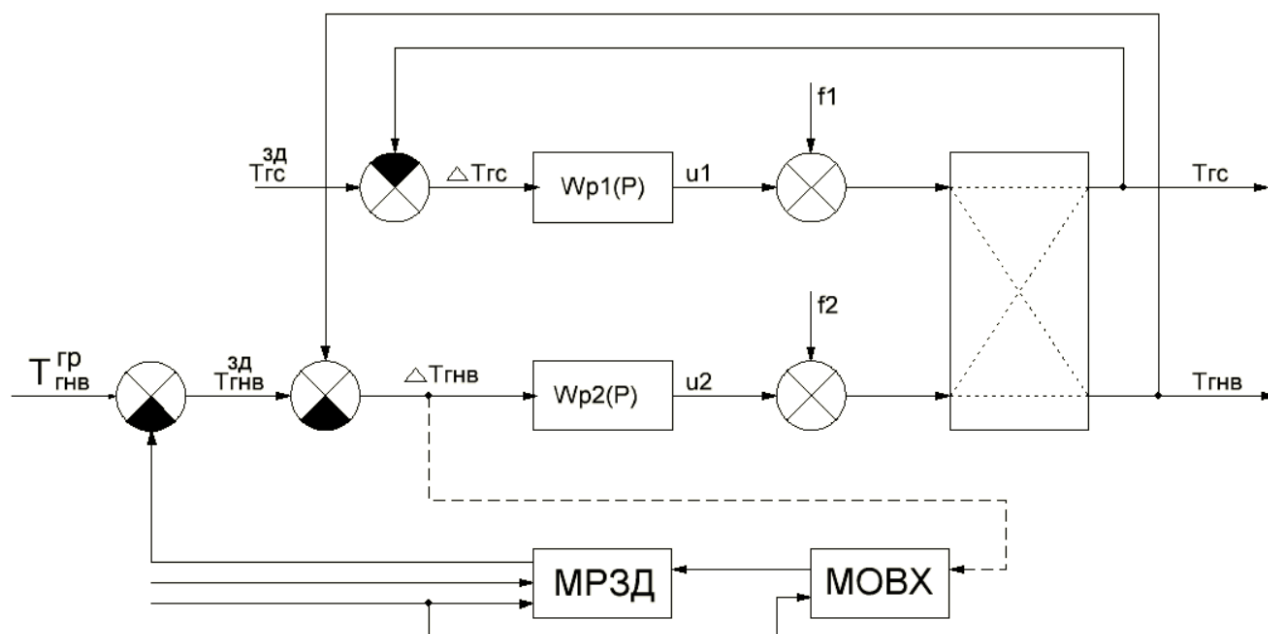


Рисунок 4.3 - Структурна схема SGK, яка забезпечує максимальне наближення фактичного значення регламентної змінної $T_{\text{гнв}}$ до її верхнього гранично-допустимого значення $T_{\text{гнв}}^{\text{гр}+}$

4.4. Розробка схеми імітаційного моделювання САК і плану комп'ютерних експериментів по дослідженню її ефективності, представлення та аналіз результатів моделювання.

Схема моделювання SGK процесом гарячого копчення представлена на рисунку 4.4. Вміст блоків розрахунку заданого значення (БРГЗД) та статистичних оцінок (БРСО) зображено на рисунках 4.5 та 4.6 відповідно.

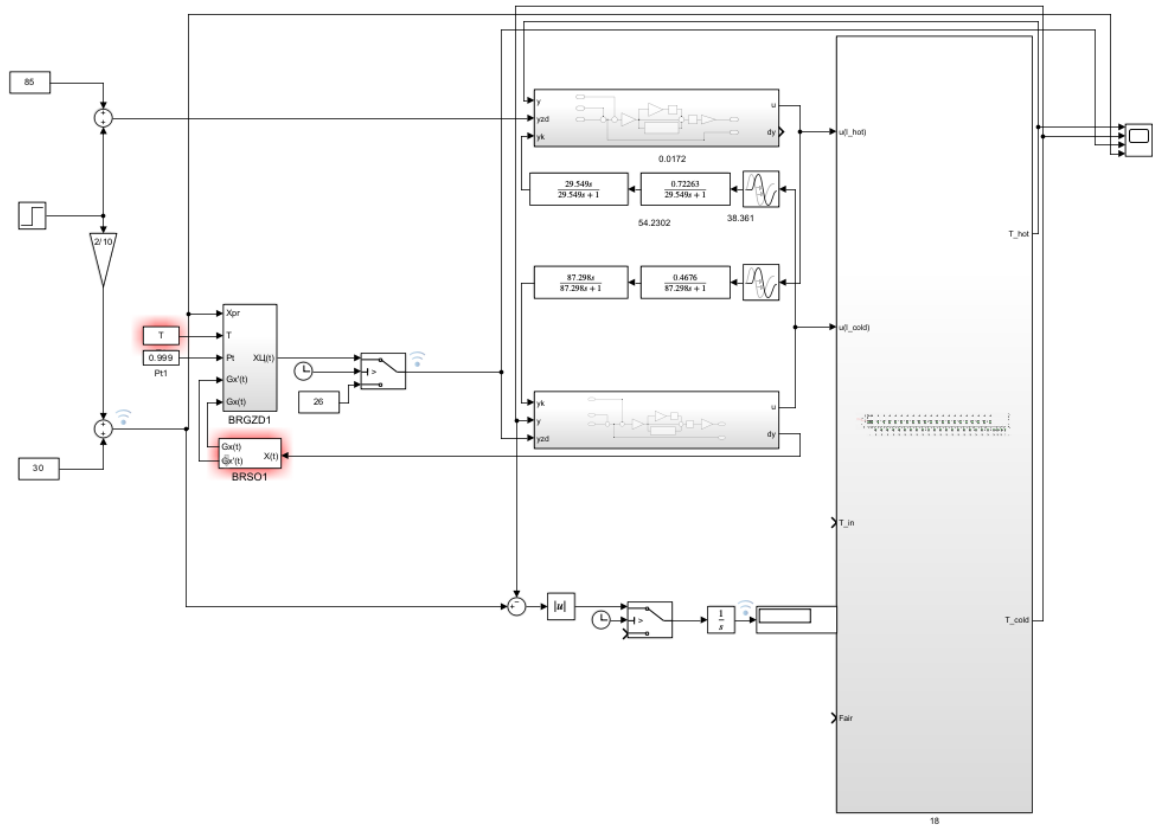


Рисунок 4.4 – Схема моделювання СГК, яка забезпечує максимальне наближення фактичного значення регламентної змінної $T_{гнв}$ до її верхнього гранично-допустимого значення $T_{гнв}^{гp+}$ в середовищі Matlab Simulink

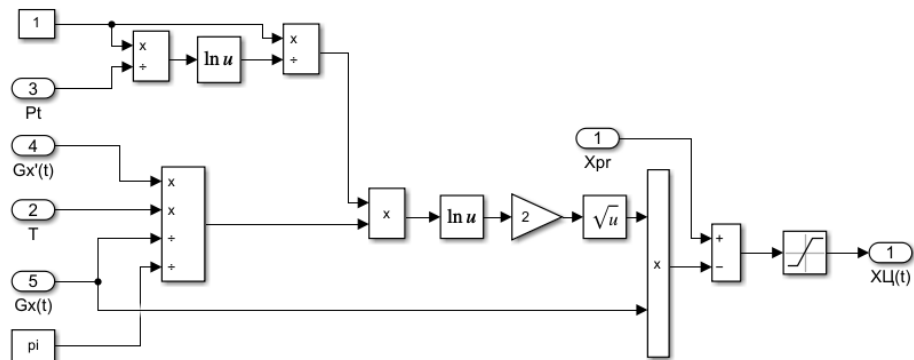


Рисунок 4.5 - Вміст БРГЗД

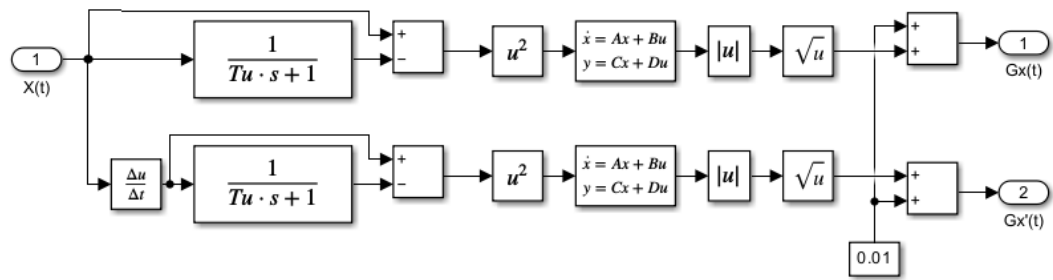


Рисунок 4.6 - Вміст БРСО

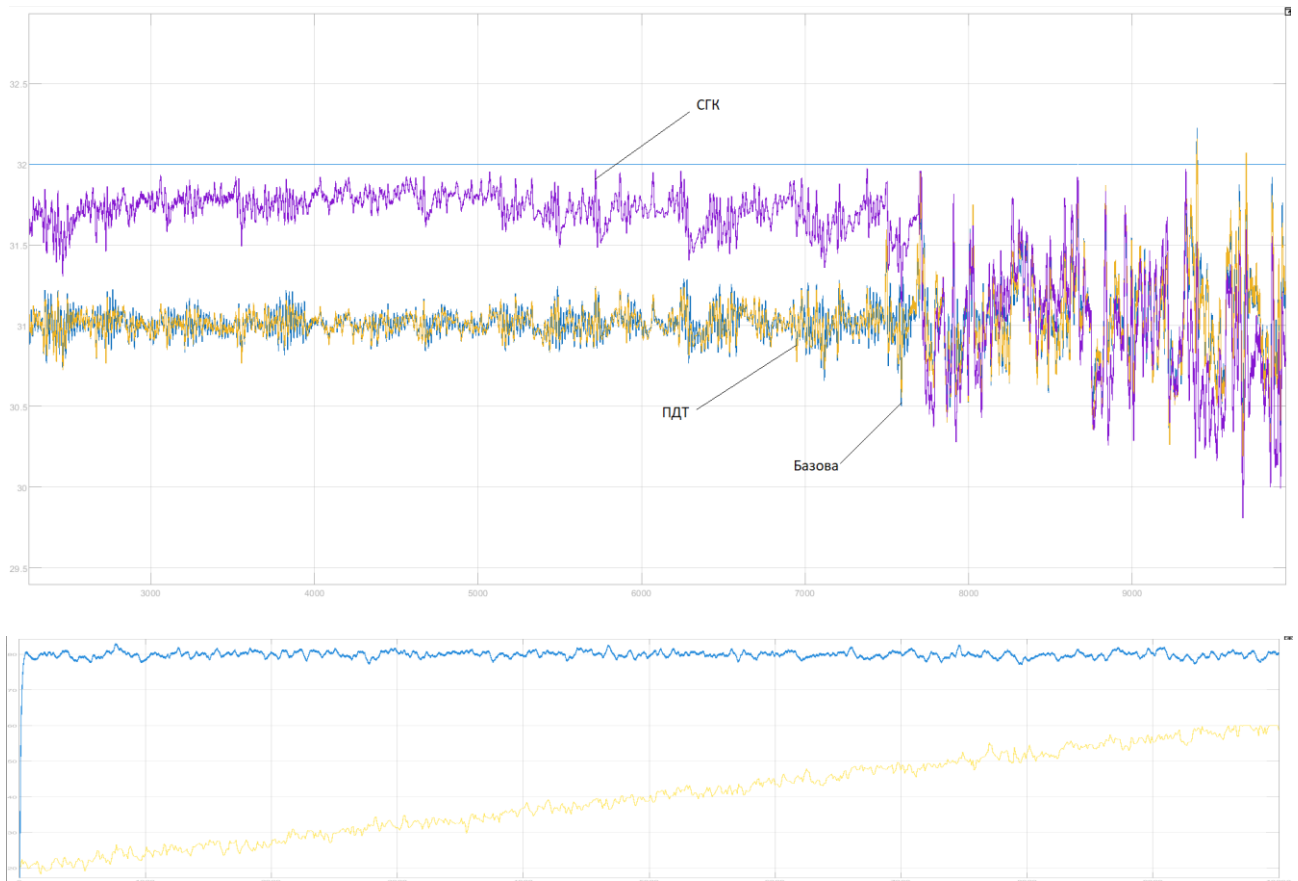


Рисунок 4.7 – Результати моделювання СГК, САК ПДТ та САК базової структури процесом гарячого копчення ковбас

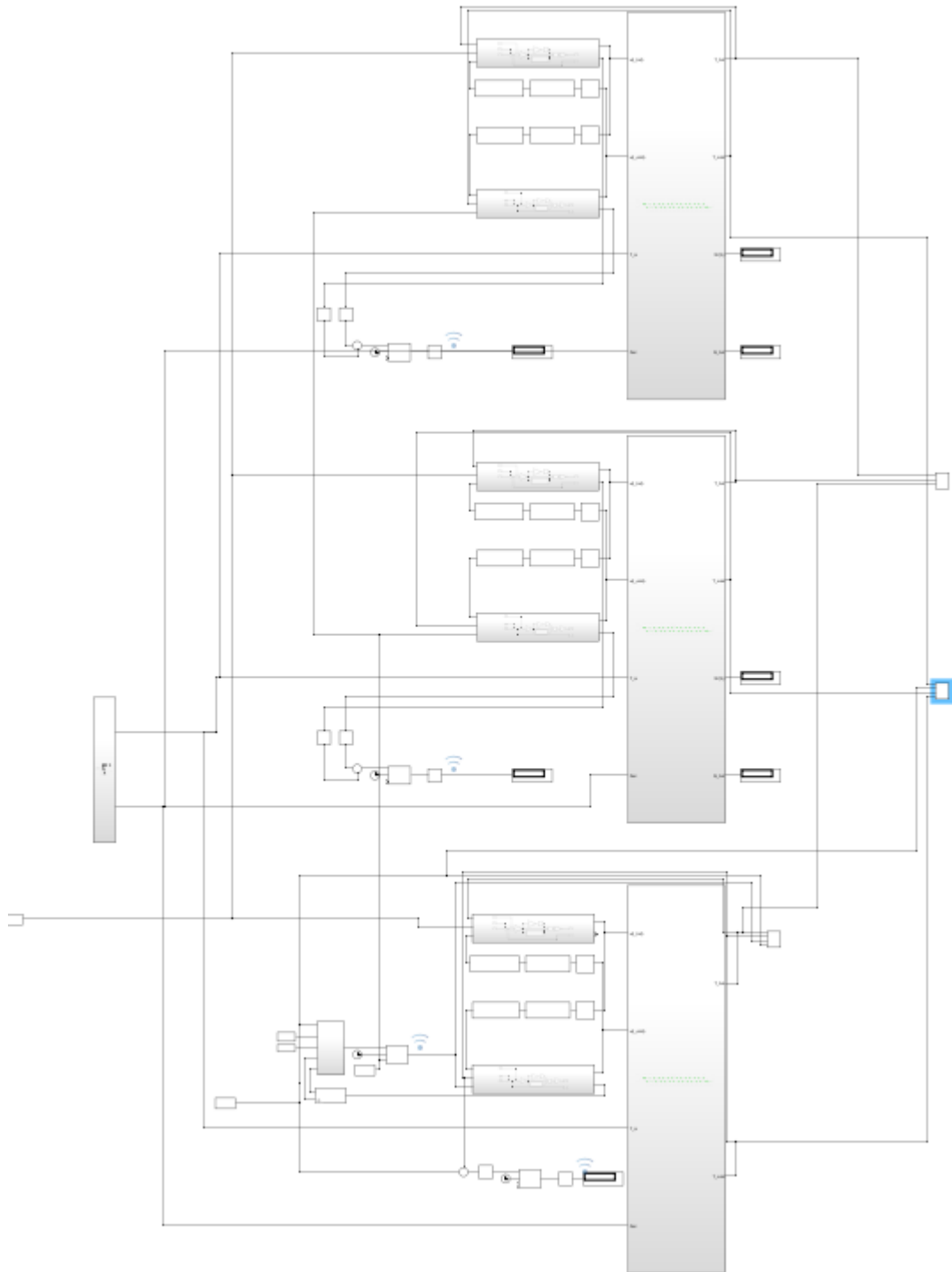


Рисунок 4.9 – Схема моделювання CAP базової структури, ПДТ та СГК

4.5. Висновки за розділом.

Найчастіше на змінні об'єкта керування регламентами накладаються обмеження, порушення яких може мати дуже несприятливі наслідки. Вони можуть призводити до аварійних зупинок обладнання, втрат сировини та енергоносіїв, зниження якості продукції, необхідність мати великий штаб

персоналу та ремонтних служб. Ситуація посилюється, якщо найбільш ефективні режими роботи ОУ близькі до гранично-допустимих, ОУ є суттєво нестационарним, схильний до інтенсивних неконтрольованих збурень, має запізнення в каналах управління, а наслідки порушень тяжкі.

Для процесу гарячого копчення ковбас функція ефективності знаходиться за межами регламенту і задача підвищення продуктивності та ефективності вимагає від нас наближення до верхнього обмеження без його порушення. Для реалізації функції максимізації продуктивності та енергоефективності роботи ОК з гарантованою відсутністю викидів за верхню межу було розроблено СГК з розрахунком допустимого заданого значення контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту. З початковими налаштуваннями параметрів СГК кількість викидів за верхню межу дорівнювала 1, але після їх оптимізації кількість викидів дорівнювала 0. Після порівняльного аналізу роботи САК базової структури, САК ПДТ та САК СГК можна зробити наступні висновки: СГК є більш енерго ефективною і, водночас, більш якісною, гарантуючи максимальне наближення до граничної межі, але при цьому не перетинаючи її – дотримуючись регламенту.

РОЗДІЛ 5. РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ПІДГОТОВКА ДО ВПРОВАДЖЕННЯ НА ПІДПРИЄМСТВІ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.

5.1. Розробка програмно-технічної структури

Промислові програмовані логічні контролери ПЛК стали невід’ємною частиною сучасних систем керування. Хоча кількість та різноманіття поставлених перед ними задач тільки зростають, більшість ПЛК мають закриту та жорстку архітектуру і, у зв’язку з цим, відносно обмежений функціонал. Ціна та специфічні особливості експлуатації таких ПЛК ускладнюють їх використання для домашньої автоматизації та у навчальних цілях. Розділ присвячений розробці вбудованої мікропроцесорної системи керування процесом гарячого копчення ковбас на базі одно-платного комп’ютера BeagleBone Black, який матиме відкриту архітектуру, потужним виконавчим середовищем, підтримуватиме більшість сучасних протоколів зв’язку, матиме широкий функціонал і при цьому низьку ціну.

5.1.1. Технічна структура

Для реалізації алгоритмів керування контролер повинен мати:

- аналогові входи для вимірювання температур термопарами(2),
- UART інтерфейс для взаємодії з блоком живлення ТЕС (1),

Виходячи з сформованої таблиці та складності алгоритмів керування, для реалізації системи керування було використано одно-платний комп’ютер BeagleBone Black та спеціалізовані АЦП для роботи з термопарами ADC MAX 6675. Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом каталітичної очистки інертних газів, що включає АРМ оператора, представлена на рисунку 5.1.

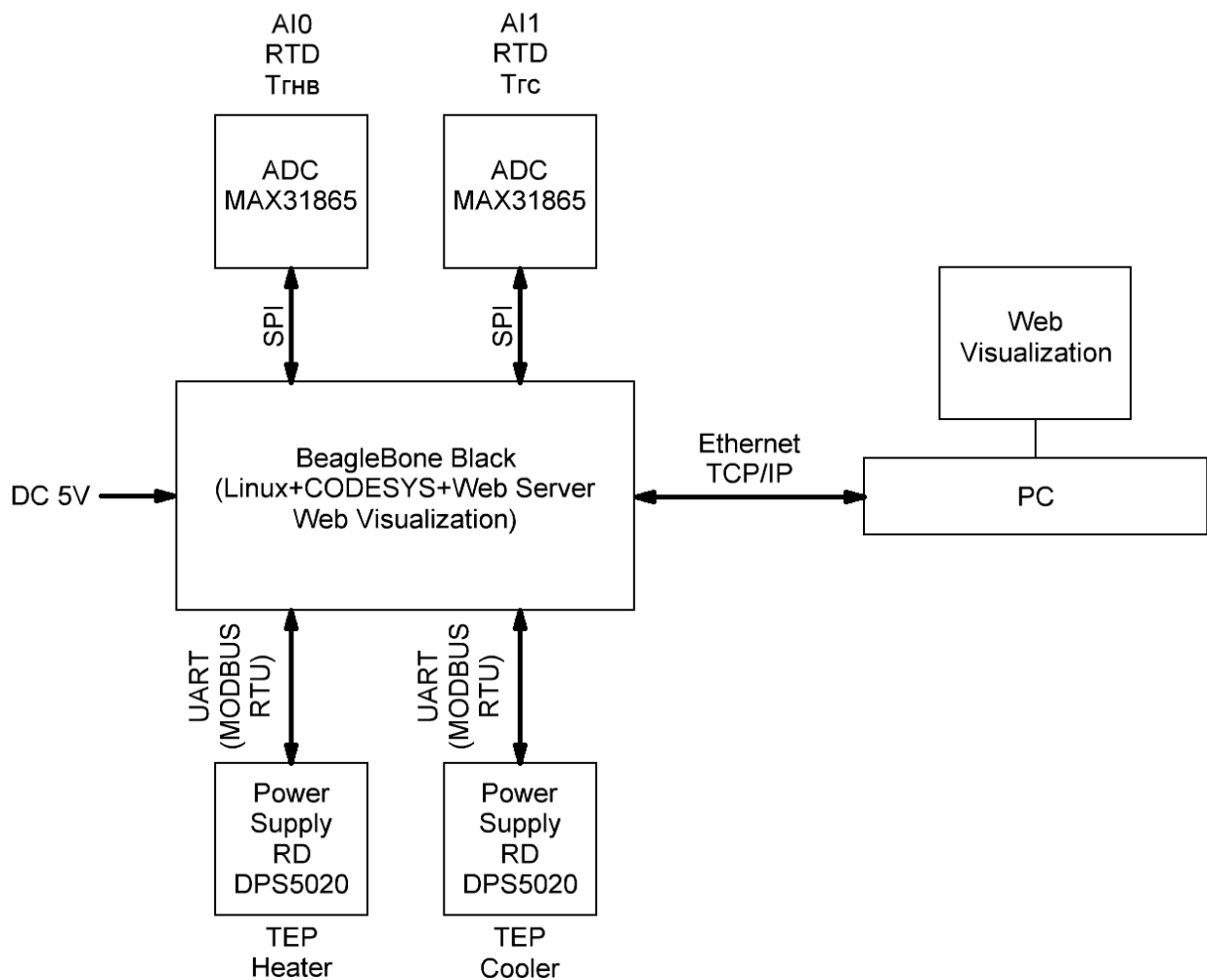


Рис. 5.1 – Схема технічної структури мікропроцесорного ядра системи керування процесом гарячого копчення ковбас

5.1.2. Реалізація ПЛК на базі BeagleBone Black

Для реалізації ПЛК, орієнтованого на використання у вбудованих системах керування, обрано одноплатний комп'ютер BeagleBone Black з операційною системою (ОС) Linux та виконавчого середовища CoDeSys V3.5.

Основні характеристики BeagleBone Black:

Графічний процесор	SGX530 3D, 20M Polygons/S
Частота процесора	1 ГГц, AM335x з процесором ARM Cortex-A8
Діапазон робочої напруги	5 В з 210-460 мА
Порти GPIO	69 контактів вводу/виводу (але можна використовувати й інші)
Локальна мережа	є

SD-карта	є
HDMI	є
Джерело живлення	DC Power Jack, mini USB Port
Роз'єми розширення	MCASP, SPI, I ² C, LCD, MMC, GPMC, UART, Power Button, XDMA Interrupt, CAN, EHRPWM, PWM, ADC, GPIO
Оперативна пам'ять (SRAM)	512 МБ (DDR3L – 800 МГц)
Налагодження	JTAG and Serial Header
FLASH (пам'ять програм)	4 ГБ, 8-розрядна версія eMMC
EEPROM	512 байтів

5.2. Розробка та налагодження прикладного програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування (СГК) гарячого копчення ковбас.

5.2.1. Переслідувані цілі та основні положення.

Після розробки та тестування алгоритмів безперервного та логіко-програмного керування, спеціалістами з систем керування, під час програмування ПЛК спеціалістами-програмістами подекуди виникають різноманітні проблеми пов'язані з «людським» фактором, які призводять до неточної реалізації алгоритму в програмному коді. Одним з шляхів запобігання цих помилок є використання модельно-орієнтованого проектування (МОП) програмного забезпечення, що дозволяє розробляти та проводити імітаційне моделювання як усієї системи цілком, так і її компонентів. МОП включає в себе побудову моделі ОК, аналіз і побудова алгоритму керування, моделювання системи керування і як результат – реалізація системи на «реальному» ОК. А автоматична генерація програмного коду зменшує вірогідність появи більшості помилок пов'язаних із людським фактором та дозволяє суттєво скоротити час розробки та верифікації прикладного програмного забезпечення. Одним з інструментів модельно-орієнтованого проектування є пакет прикладних програм MATLAB та його додаток для візуального програмування при моделюванні динамічних систем SIMULINK. Додаток Simulink PLC Coder дозволяє конвертувати отриманий алгоритм або його частини у програмний код у вигляді структурованого тексту для подальшого використання в різноманітних ПЛК.

Розроблене програмне забезпечення має реалізовувати алгоритм системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів в середовищі Simulink, що описує структурна схема на рисунку 4.3.

В основу цього алгоритму входять не тільки ті елементи, які можна знайти у стандартних бібліотеках середовища програмування CodeSys V3.5. Саме тому виникає необхідність у використанні можливості автоматичної генерації програмного коду.

5.2.2. Реалізація «цифрової» моделі СГК процесом каталітичної очистки інертних газів в середовищі Simulink, з використанням бібліотеки PLCLib пакета Simulink PLC Coder.

Після розробки та тестування «безперервної» моделі системи керування, першим кроком в до її конвертації у програмний код у вигляді структурованого тексту для подальшого використання в середовищі програмування CodeSys V3.5 є представлення цієї моделі в «дискретному» (цифровому) часі. Модель системи керування складається з різних модулів, які конвертуються окремо один від одного, а саме: ПД-регулятор (рисунок 5.2), коригуючий міжрегуляторний зв'язок (рисунок 5.3), блок розрахунку статистичних оцінок (рисунок 5.4) та блоку розрахунку гарантуючого заданого значення (5.5).

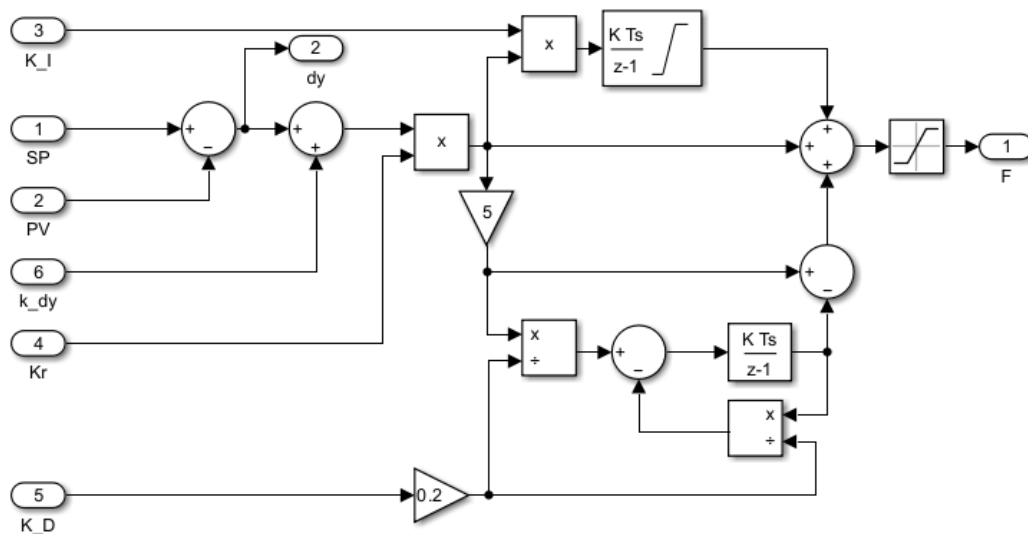


Рисунок 5.2 – Цифрова реалізація ПД-регулятора в середовищі Simulink

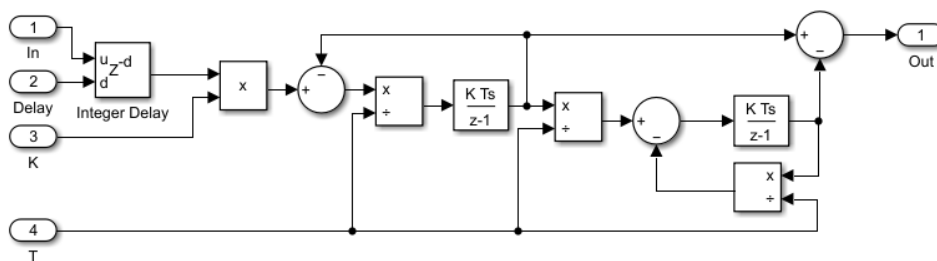


Рисунок 5.3 – Цифрова реалізація коригуючого міжрегуляторного зв'язку в середовищі Simulink

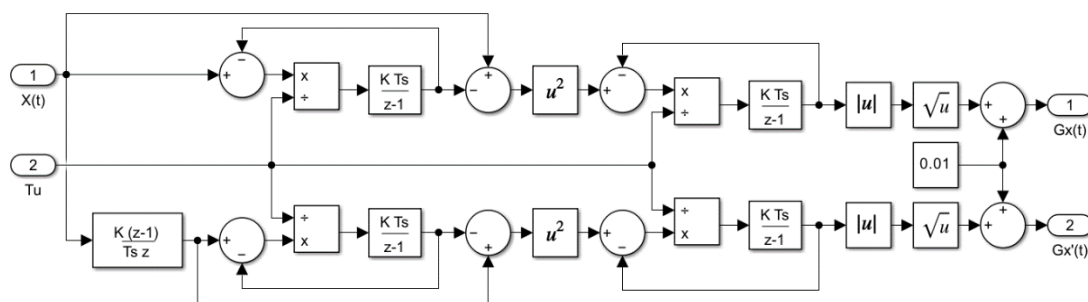


Рисунок 5.4 – Цифрова реалізація блоку розрахунку статистичних оцінок (БРСО) в середовищі Simulink

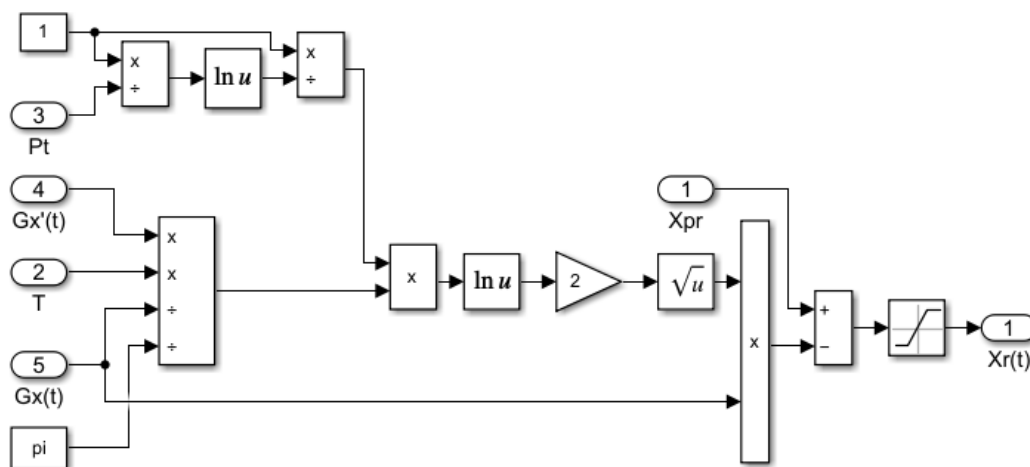


Рисунок 5.5 – Цифрова реалізація блоку розрахунку гарантованого заданого значення (БРГЗД) в середовищі Simulink

Схема для порівняння роботи цифрової та «безперервної» моделей системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів в середовищі Simulink представлена на рисунку 5.6, результати порівняльного моделювання цих систем – на рисунку 5.7.

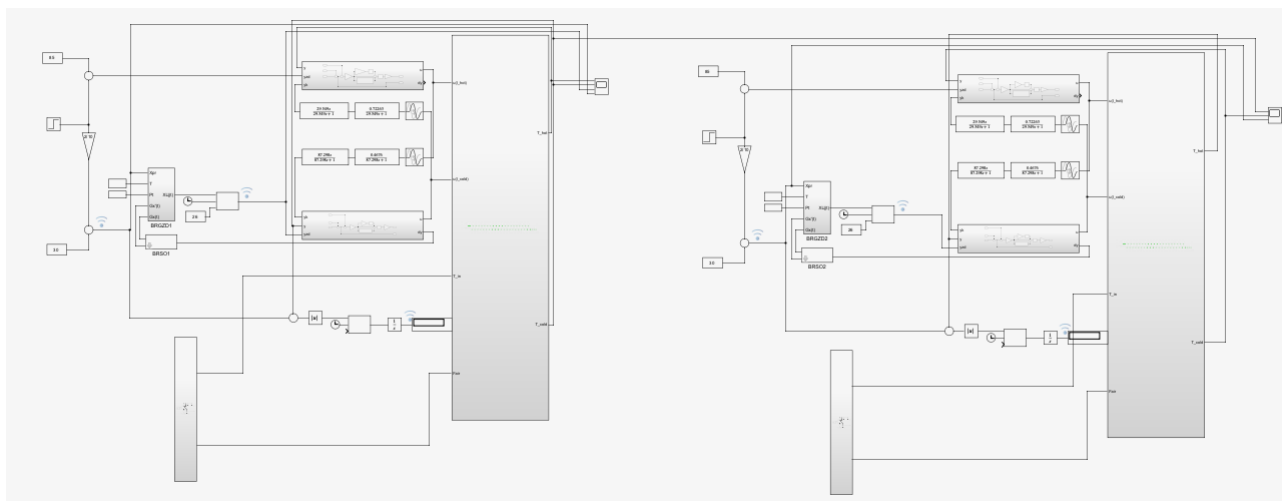


Рисунок 5.6 – Схема для порівняння роботи цифрової та «безперервної» моделей системи гарантуючого керування процесом гарячого окпчення ковбас в середовищі Simulink

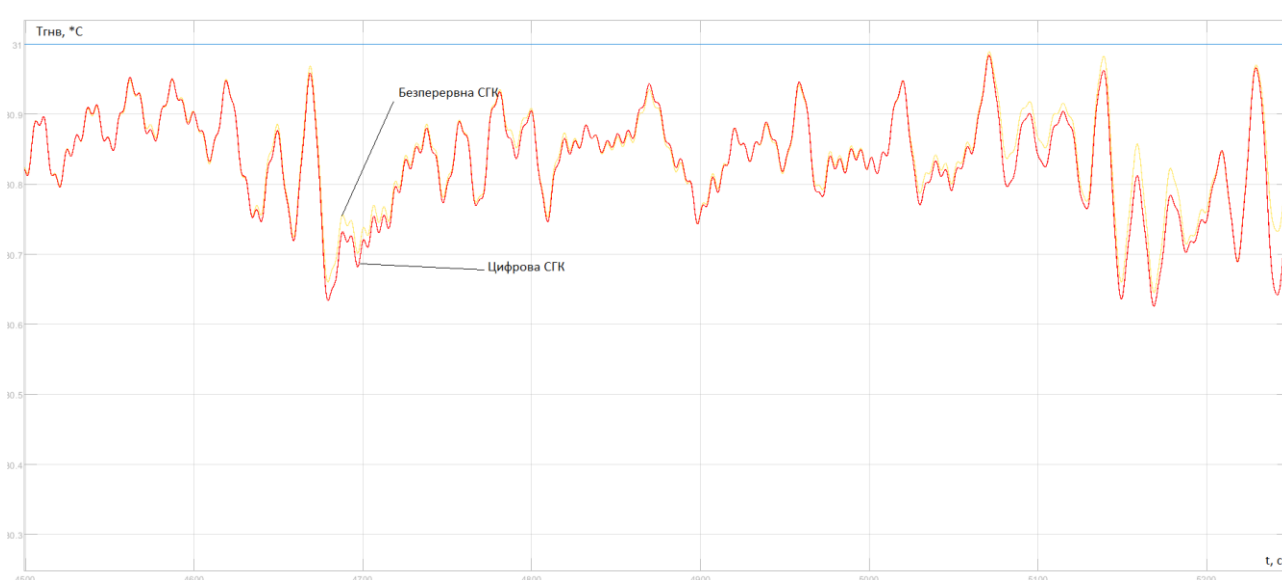


Рисунок 5.7 – Результати порівняльного моделювання цифрової та «безперервної» моделей системи гарантуючого керування процесом гарячого копчення ковбас в середовищі Simulink

Як видно з рис. 5.7 різниця між якістю роботи цифрової та «безперервної» моделей системи гарантуючого керування мінімальна, а значить можна зробити висновок про доцільність конвертації розробленої цифрової моделі Simulink, що реалізує алгоритм системи гарантуючого керування процесом гарячого копчення ковбас, у програмний код.

5.2.3. Конвертація моделі цифрового алгоритму системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів в програмний код для

середовища програмування ПЛК – CodeSys V3.5, за допомогою пакета Simulink PLC Coder.

Перед генерацією програмного коду необхідно обрати цільове інтегроване середовище розробки. Для цього натискаємо правою кнопкою миші по підсистемі та переходимо у «PLC Code => Options...», де у рядку «Target IDE» обираємо, в нашому випадку, «3S CoDeSys 3.5». Щоб згенерувати код натискаємо правою кнопкою миші по підсистемі => «PLC Code => Generate Code for Subsystem». Після чого автоматично створюються файл ST та XML Document що мають таку ж назву як і файл Simulink.

Для імпорту файлів та оновлення компонентів з Simulink PLC Coder необхідно встановити плагін CODESYS «Simulink PLC Coder Import». Далі відкриваємо проект CODESYS, переходимо в меню «Проект => Simulink PLC Coder Import...» та обираємо «Add and import PLC Coder files...» після чого відкриваємо згенерований XML Document. Для використання згенерованої частини програмного коду необхідно додати блок «Елемент» та підписати його назвою підсистеми в Simulink. На рисунку 5.8 показане вікно «Simulink PLC Coder Import», на рисунку 5.9 показані функціональні блоки ПД-регулятора, коригуючого зв'язку, БРСО та БРГЗД у виконавчому середовищі CoDeSys V3.5. На рисунках 5.10 – 5.13 відображено фрагменти програм функціональних блоків.

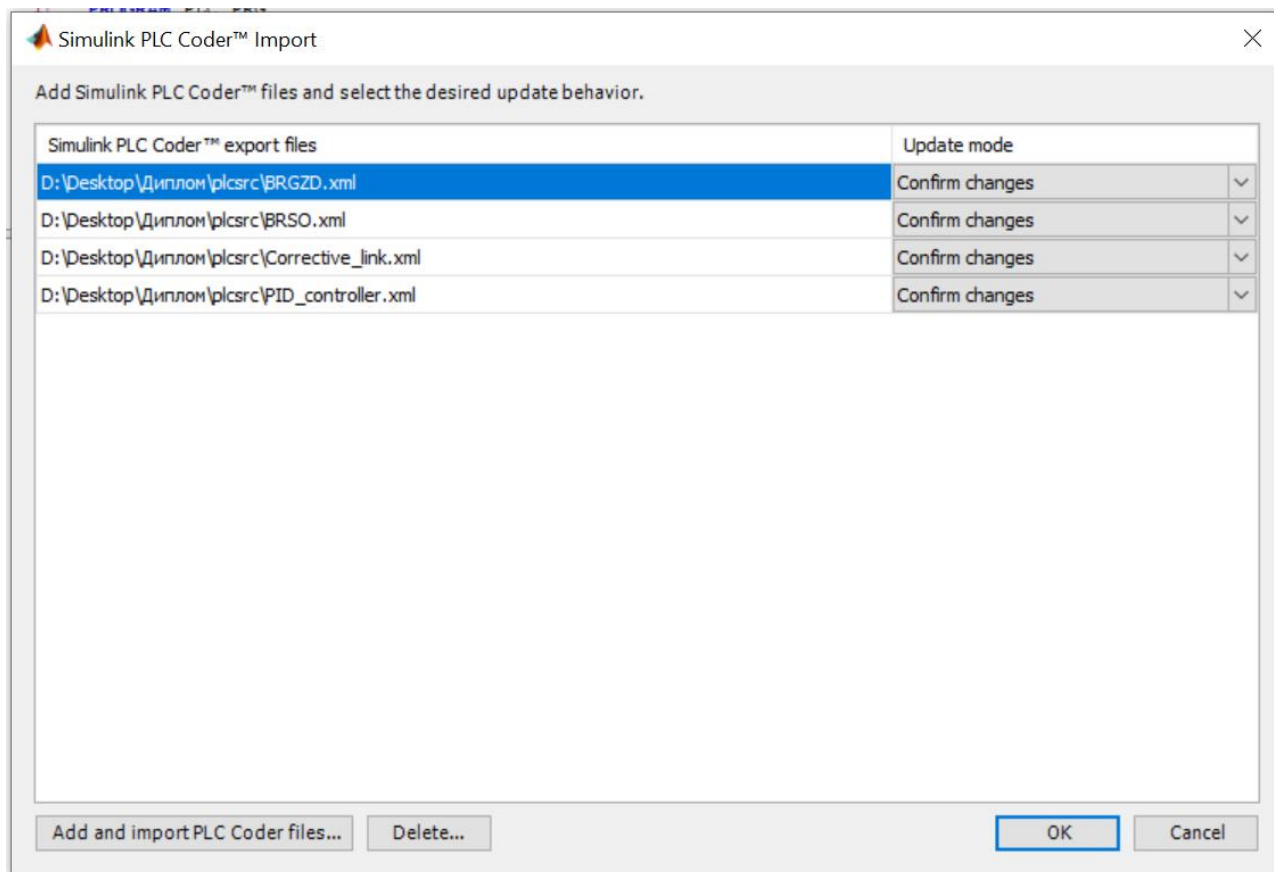


Рисунок 5.8 - Вікно «Simulink PLC Coder Import»

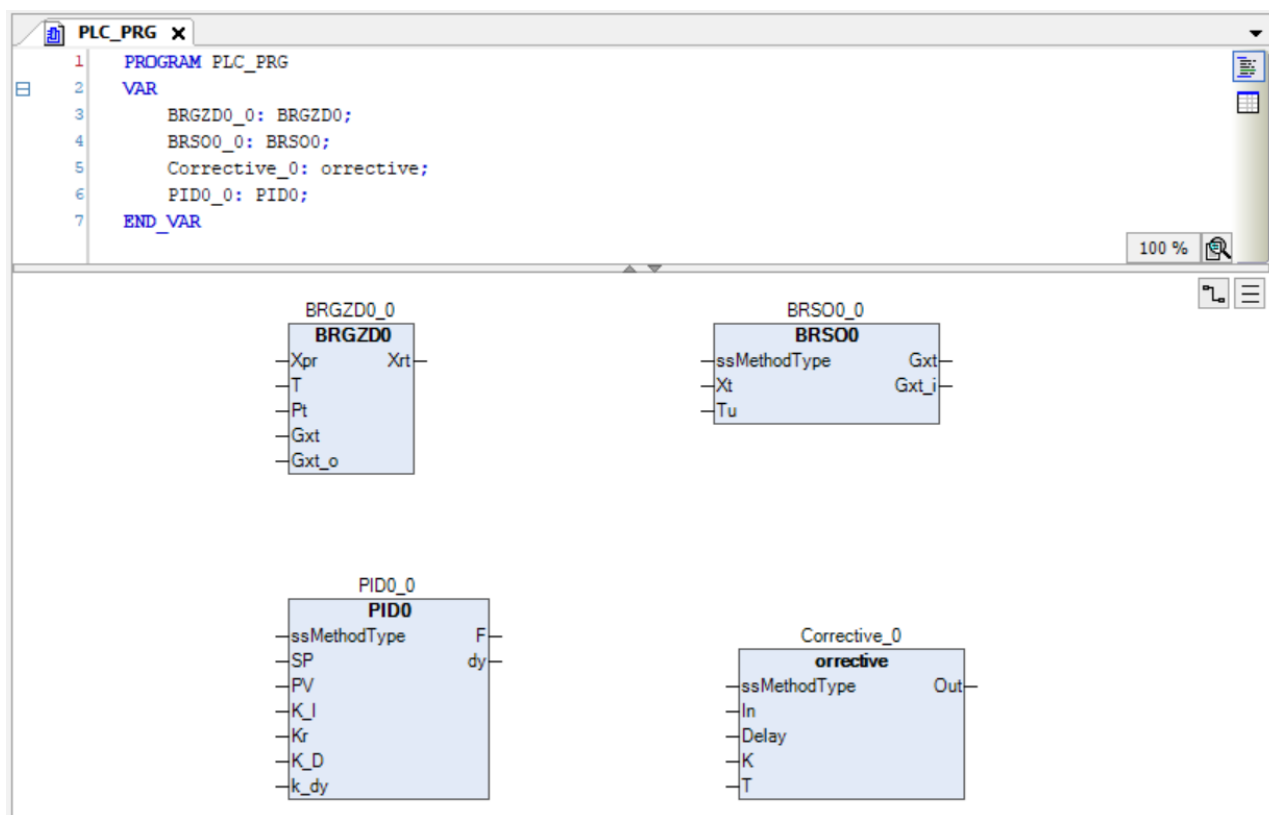


Рисунок 5.9 - Функціональні блоки ПІД-регулятора, коригуючого зв'язку, БРСО та БРГЗД у виконавчому середовищі CoDeSys V3.5

```

1  FUNCTION_BLOCK PID0
2  VAR_INPUT
3      ssMethodType: SINT;
4      SP: LREAL;
5      PV: LREAL;
6      K_I: LREAL;
7      K_r: LREAL;
8      K_D: LREAL;
9      k_dy: LREAL;
10 END_VAR
11 VAR_OUTPUT
12     F: LREAL;
13     dy: LREAL;
14 END_VAR

22     rtb_Gain3 := 5.0 * rtb_Sum4;
23
24     IF plc_ts_counter1 = 0 THEN
25         (* DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator3' *)
26         DiscreteTimeIntegrator3 := c_DiscreteTimeIntegrator3_D;
27     END_IF;
28
29     (* Sum: '<S1>/Sum4' incorporates:
30      * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator'
31      * Sum: '<S1>/Sum10' *)
32     F := (c_DiscreteTimeIntegrator_DS + rtb_Sum4) + (rtb_Gain3 - DiscreteTimeIntegrator3);
33     (* Saturate: '<S1>/Saturation' *)
34
35     IF F > 100.0 THEN
36         (* Outport: '<Root>/F' *)
37         F := 100.0;
38     ELSIF F < 0.0 THEN
39         (* Outport: '<Root>/F' *)

```

Рис. 5.10 - Фрагмент згенерованого коду у вигляді структурованого тексту в середовищі CodeSys V3.5 для блоку ПД-регулятора

```

1  FUNCTION_BLOCK orrective
2  VAR_INPUT
3      ssMethodType: SINT;
4      In: LREAL;
5      Delay: UDINT;
6      K: LREAL;
7      T: LREAL;
8  END_VAR
9  VAR_OUTPUT
10     Out: LREAL;
11 END_VAR

52     Product5 := ((rtb_IntegerDelay * K) - DiscreteTimeIntegrator4) / T;
53     (* Sum: '<S1>/Sum2' incorporates:
54      * Product: '<S1>/Product3'
55      * Product: '<S1>/Product4' *)
56     Sum2 := (DiscreteTimeIntegrator4 / T) - (DiscreteTimeIntegrator1 / T);
57
58     IF plc_ts_counter1 = 0 THEN
59         (* Sum: '<S1>/Sum8' *)
60         rtb_Sum8 := DiscreteTimeIntegrator4 - DiscreteTimeIntegrator1;
61         (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator1' *)
62         c_DiscreteTimeIntegrator1_D := c_DiscreteTimeIntegrator1_D + Sum2;
63         (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator4' *)
64         c_DiscreteTimeIntegrator4_D := c_DiscreteTimeIntegrator4_D + Product5;
65     END_IF;
66
67     (* Update for Delay: '<S1>/Integer Delay' *)
68
69     FOR i := 0 TO 98 DO
70         IntegerDelay_DSTATE[i] := IntegerDelay_DSTATE[i + 1];
71     END_FOR;

```

Рис. 5.11 - Фрагмент згенерованого коду у вигляді структурованого тексту в середовищі CodeSys V3.5 для блоку корекції

середовищі CodeSys V3.5 для блоку коригуючого зв'язку

```

1  FUNCTION BLOCK BRS00
2  VAR_INPUT
3      ssMethodType: SINT;
4      Xt: LREAL;
5      Tu: LREAL;
6  END_VAR
7  VAR_OUTPUT
8      Gxt: LREAL;
9      Gxt_i: LREAL;
10 END_VAR
11 VAR
12     c_DiscreteTimeIntegrator1_D: LREAL;
13     c_DiscreteTimeIntegrator2_D: LREAL;
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53     rtb_Sqrt := SQRT(temp1);
54     (* Sqrt: '<S1>/Sqrt1' incorporates:
55      * Abs: '<S1>/Abs3'
56      * DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator2' *)
57     temp2 := ABS(c_DiscreteTimeIntegrator2_D);
58     rtb_Sqrt1 := SQRT(temp2);
59     (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator1' incorporates:
60      * Math: '<S1>/Math Function4'
61      * Product: '<S1>/Product1'
62      * Sum: '<S1>/Sum7' *)
63     c_DiscreteTimeIntegrator1_D := (((rtb_Diff * rtb_Diff) - c_DiscreteTimeIntegrator1_D) / Tu) +
64     (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator2' incorporates:
65      * Math: '<S1>/Math Function5'
66      * Product: '<S1>/Product2'
67      * Sum: '<S1>/Sum6'
68      * Sum: '<S1>/Sum8' *)
69     c_DiscreteTimeIntegrator2_D := (((rtb_Sum6_tmp * rtb_Sum6_tmp) - c_DiscreteTimeIntegrator2_D) / Tu) +
70     (* Update for DiscreteIntegrator: '<S1>/Discrete-Time Integrator3' incorporates:

```

Рис. 5.12 - Фрагмент згенерованого коду у вигляді структурованого тексту в середовищі CodeSys V3.5 для блоку БРСО

```

1  FUNCTION BLOCK BRGZD0
2  VAR_INPUT
3      Xpr: LREAL;
4      T: LREAL;
5      Pt: LREAL;
6      Gxt: LREAL;
7      Gxt_o: LREAL;
8  END_VAR
9  VAR_OUTPUT
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19     (* About '<S1>/Math Function7':
20      * Operator: log *)
21     temp1 := LN(1.0 / Pt);
22     temp2 := LN((((Gxt * T) / Gxt_o) / 3.1415926535897931) * (1.0 / temp1));
23     Xrt := Xpr - (SQRT(temp2 * 2.0) * Gxt_o);
24     (* Saturate: '<S1>/Saturation' *)
25
26     IF Xrt > 600.0 THEN
27         (* Output: '<Root>/Xr(t)' *)
28         Xrt := 600.0;
29     ELSIF Xrt < 500.0 THEN
30         (* Output: '<Root>/Xr(t)' *)
31         Xrt := 500.0;
32     END_IF;
33
34     (* End of Saturate: '<S1>/Saturation' *)
35     (* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/BRGZD' *)
36
37

```

Рис. 5.13 - Фрагмент згенерованого коду у вигляді структурованого тексту в середовищі CodeSys V3.5 для блоку БРГЗД

5.3. Розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом гарячого копчення ковбас та людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога.

5.3.1 Розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом гарячого копчення ковбас

На підставі згенерованих функціональних блоків, програмні коди яких представлені вище, розроблено програму алгоритм керування на мові CFC в середовищі CoDeSys V3.5 (рис. 5.14 – 5.16).

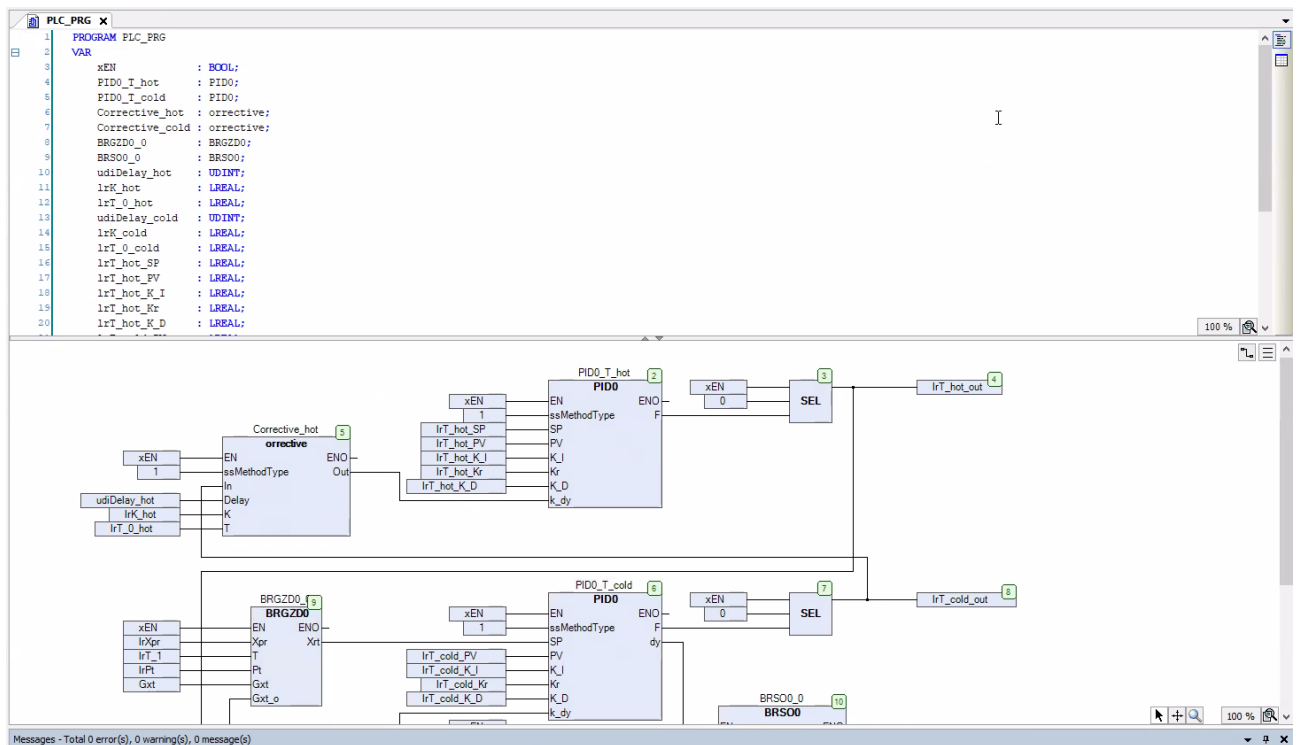


Рисунок 5.14 – Фрагменти списку змінних та програми алгоритму керування на мові CFC в середовищі CoDeSys V3.5

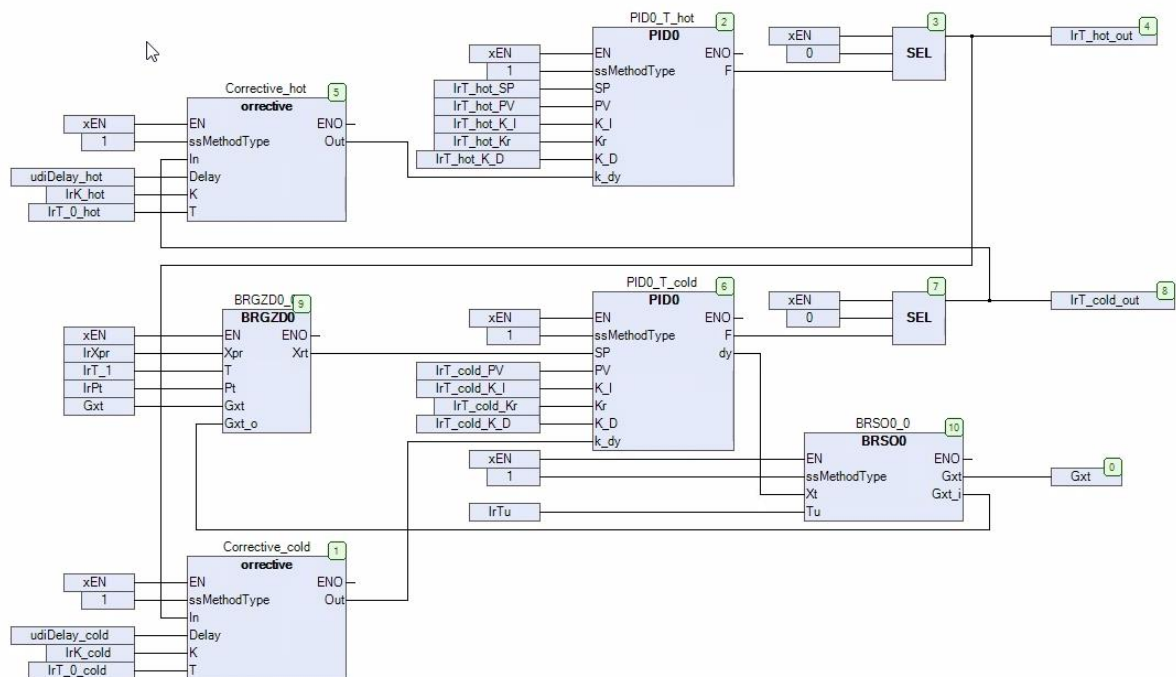


Рисунок 5.15 – Програма системи гарантующого керування процесом гарячого копчення ковбас реалізована мовою CFC в середовищі CoDeSys V3.5

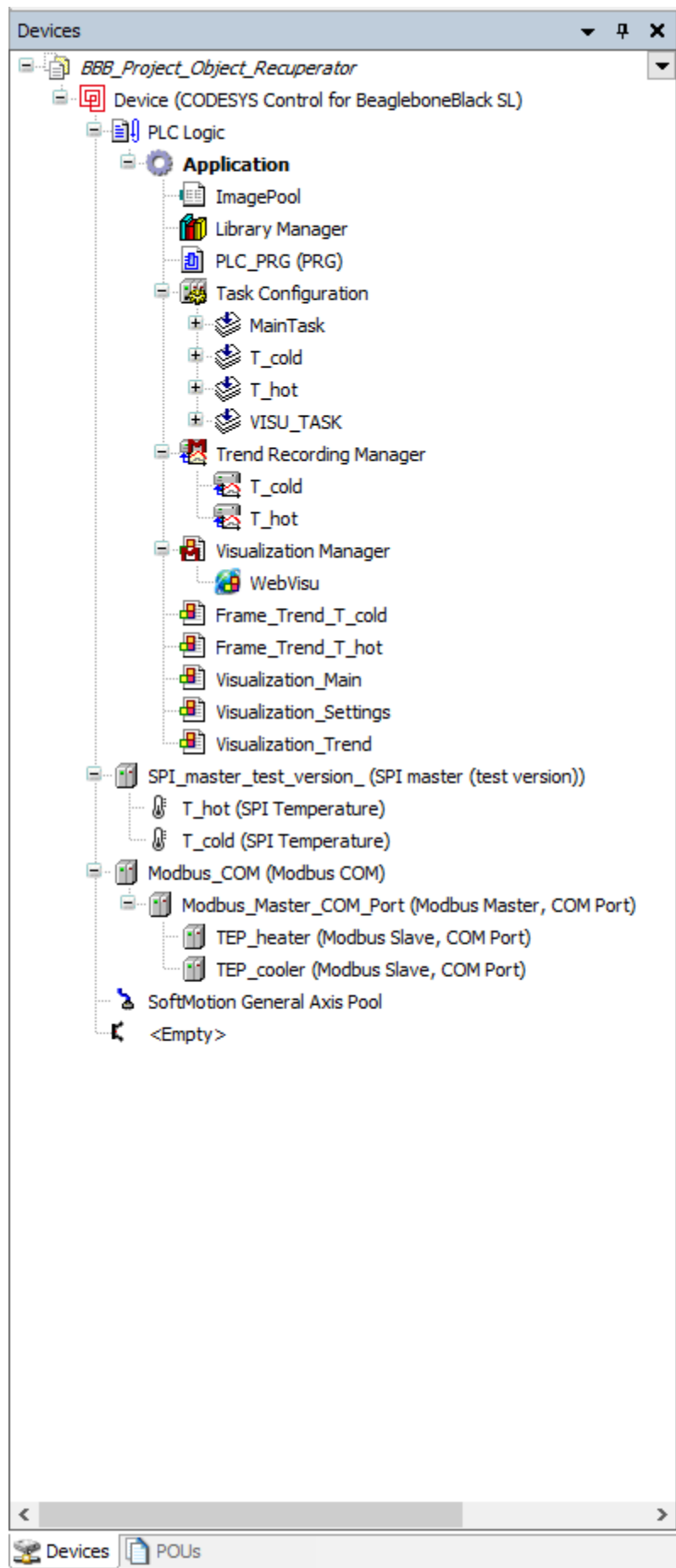


Рисунок 5.16 – Дерево програми в середовищі CoDeSys V3.5

5.3.2 Розробка програмного забезпечення людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога

Виконавче середовище CoDeSys V3.5 дозволяє реалізацію людино-машинного інтерфейсу у вигляді веб-візуалізації. Завдяки цьому оператор технолог має можливість контролю основних параметрів процесу, керування процесом та налаштування системи гарантуючого керування процесом гарячого копчення ковбас. Відповідні вікна веб-візуалізації представлені на рисунках 5.17 – 5.19.

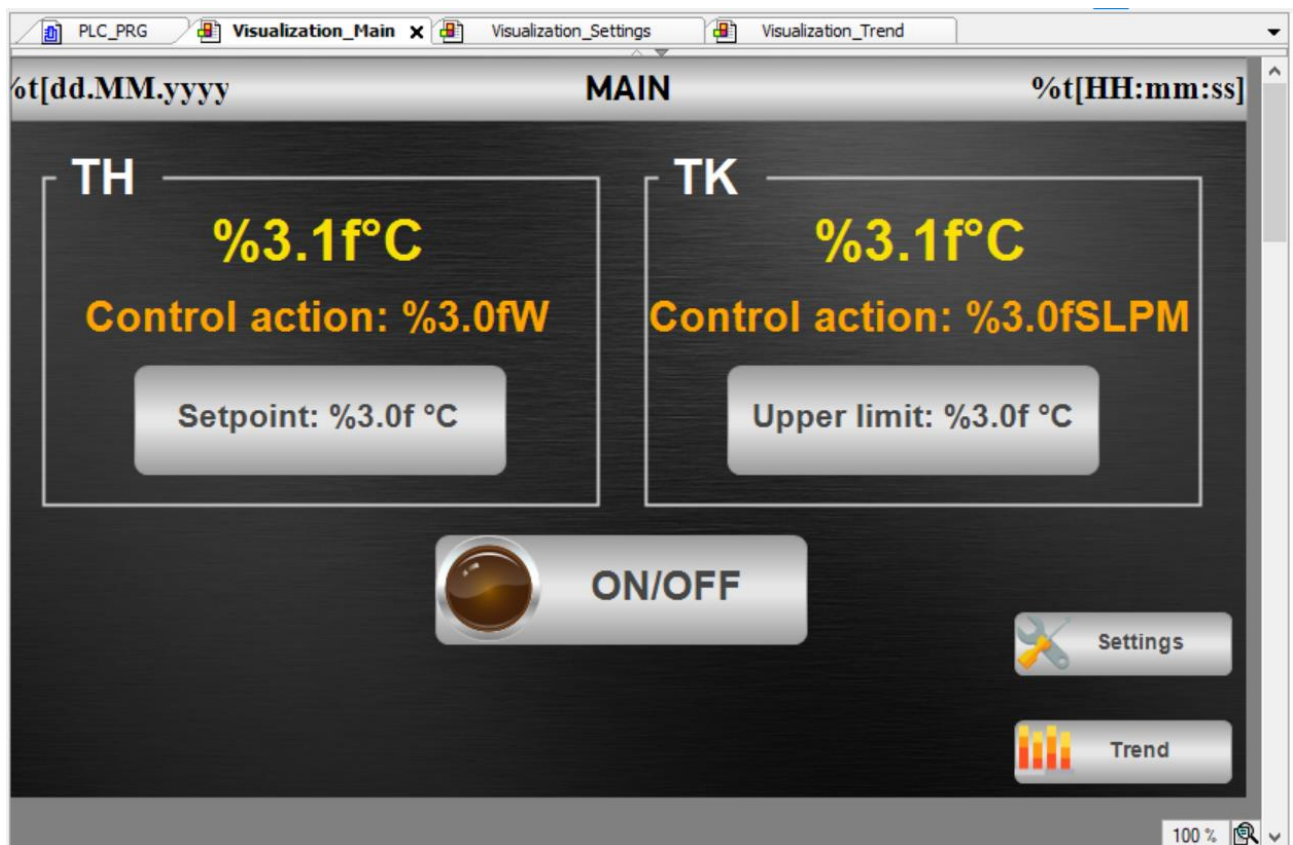


Рисунок 5.17 – Створення веб-візуалізації головного вікна, що надає можливість контролю основних параметрів процесу, запуску процесу та переходу на інші вікна

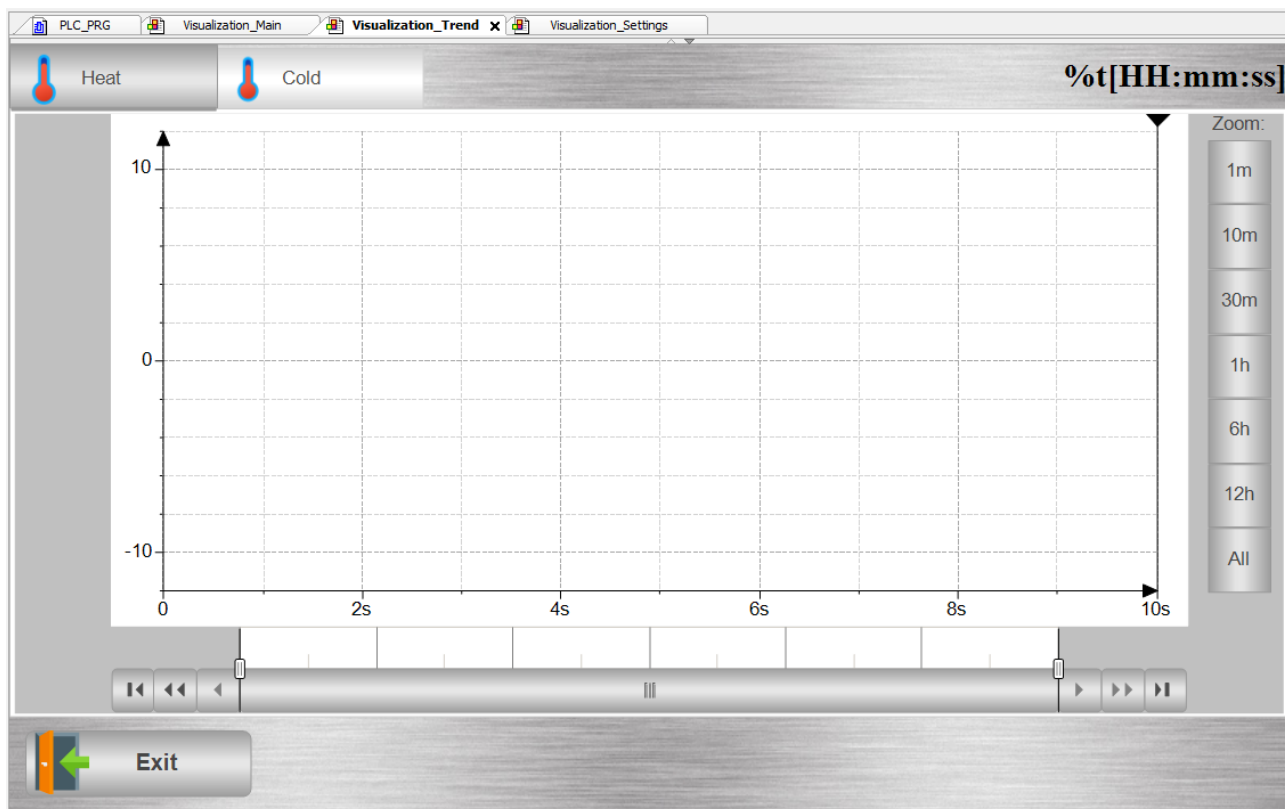


Рисунок 5.18 – Створення веб-візуалізації вікна, що надає можливість перегляду графіків зміни основних параметрів процесу

Рисунок 5.19 – Створення веб-візуалізації вікна, що надає можливість налаштування системи гарантуючого керування гарячого копчення ковбас

5.3.3 Тестування розробленого програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів та людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога.

Отримане розробленого програмного забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом гарячого копчення ковбас та людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога завантажено на одноплатний комп'ютер BeagleBone Black з виконавчим середовищем CoDeSys V3.5. Результати тестування роботи програмного забезпечення наведено на рисунках 5.20 - 5.23.

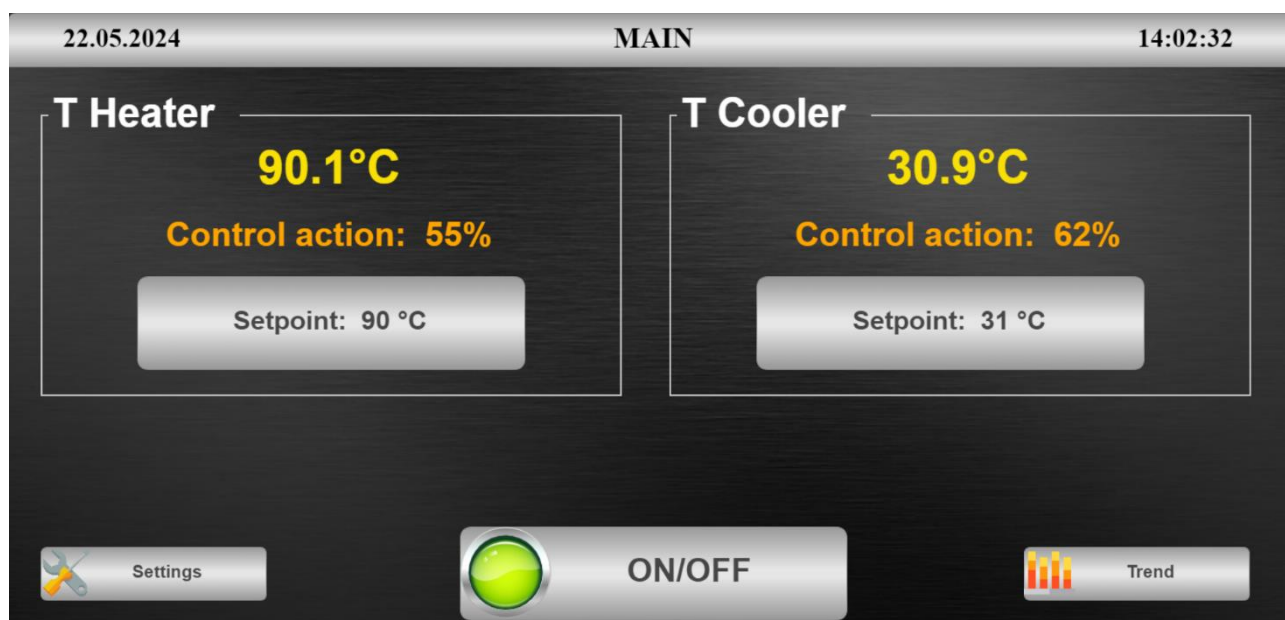


Рисунок 5.20 – Тестування веб-візуалізації головного вікна, що надає можливість контролю основних параметрів процесу, запуску процесу та переходу на інші вікна

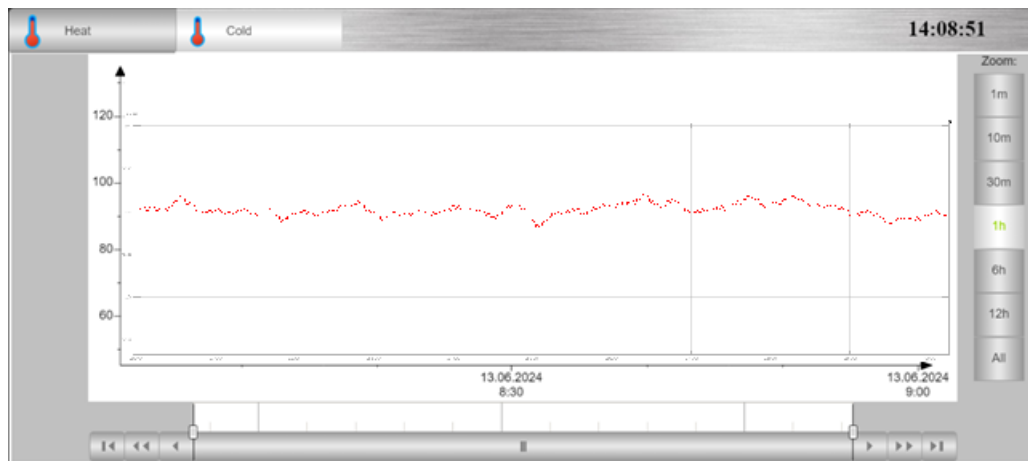


Рисунок 5.21 – Тестування веб-візуалізації вікна, що надає можливість перегляду графіку зміни температури T_{gs}

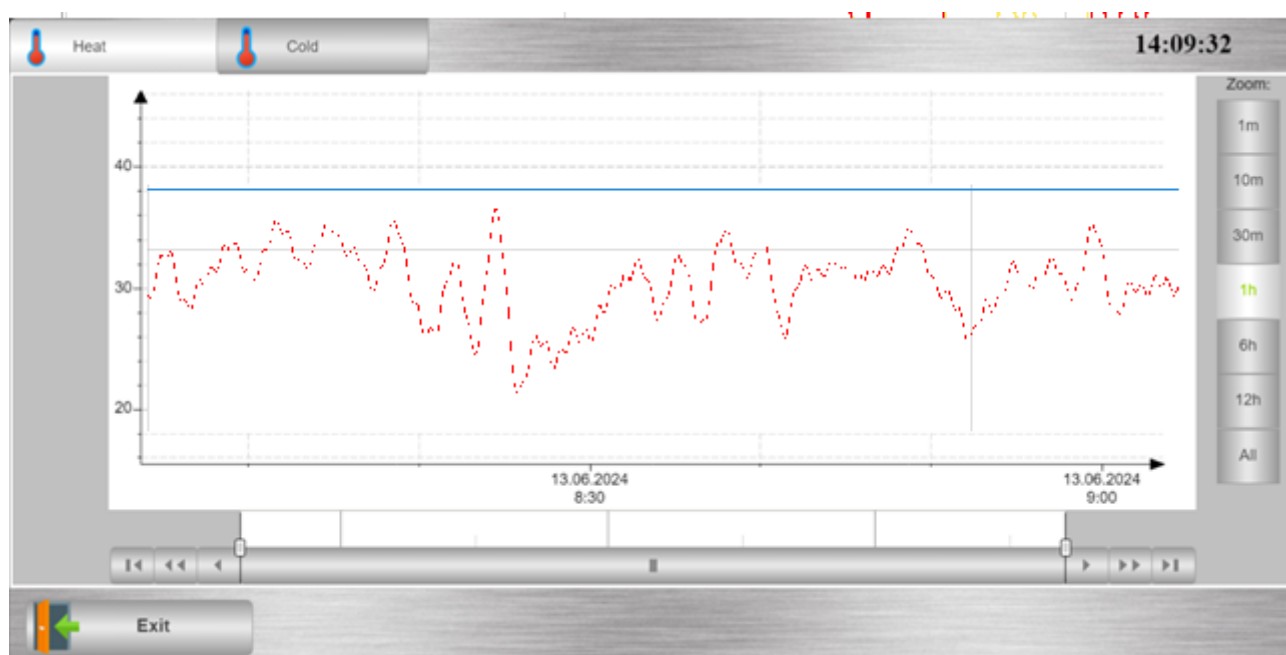


Рисунок 5.22 – Тестування веб-візуалізації вікна, що надає можливість перегляду графіку зміни температури T_{gnv}



Рисунок 5.23 – Тестування веб-візуалізації вікна, що надає можливість налаштування системи гарантуючого керування процесом гарячого копчення ковбас

5.4. Оцінка економічної ефективності впровадження розробок.

Зміст і методика формування робочої гіпотези наукових досліджень.

Обґрунтування актуальності дослідження.

Автоматизація процесу забезпечує підвищення якості готової продукції, підвищення енергоефективності процесу та розширення асортименту за рахунок забезпечення точного дотримання технологічних регламентів.

Мета дослідження.

Розробка системи автоматичного керування, яка забезпечить підприємству збільшення прибутків за рахунок зменшення витрат енергії на одиницю продукції, підвищення якості продукції та розширення асортименту

Об'єкт дослідження.

Універсальна термокамера для варки та гарячого копчення м'ясних виробів з використанням термоелектричного теплового насосу.

Предмет дослідження

Автоматизація процесу варки та гарячого копчення ковбас в універсальній термокамері з використанням термоелектричного теплового насосу

Інформаційні джерела

Внутрішня звітність підприємства, інформація про поділ зовнішнього середо-вища, статистика про споживання продукції, демографічні процеси

Стадія інноваційного проекту

- формулювання концепції досліджень;
- техніко-економічне обґрунтування проекту;
- проведення прикладних самостійних робіт;
- виконання проектно-конструкторської розробки пробного зразка;
- доробка пробного зразка;
- патентування новації (нової технології, нового засобу тощо).

Таблиця 5.1 – Опис інноваційної ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Впровадження автоматичного керування процесами варки та гарячого копчення ковбаси в універсальній термокамері	Виготовлення ковбасних виробів і можливість здійснення термічної обробки інших м'ясних виробів	Отримання високоякісної та більш доступної продукції
Точне дотримання температурних режимів та вологості	Розширення сфери застосування обладнання	Збільшення асортименту

Прогнозування очікуваних економічних результатів

- збільшення обсягів виробництва та реалізації продукції у регіоні, завдяки впровадження нового продукту функціонального призначення і охоплення додаткових споживачів та підвищення якості запропонованого асортименту;
- зменшення витрат електроенергії на 15%;
- зменшення втрат продукції на 7% в результаті усунення можливості механічних пошкоджень.

Зміст і методика визначення конкурентної позиції підприємства.

Таблиця 5.2 – Зважена рейтингова оцінка підприємств галузі

Характеристика	Вагомий коефіцієнт	Підприємство					
		№1 «Сутек»		№2 «Древос»		№3 ОНТУ	
		рейтинг	Зважений рейтинг	рейтинг	Зважений рейтинг	рейтинг	Зважений рейтинг
Низькі витрати	0.2	3	0,6	2	0,4	1	0,2
Рівень маркетингу	0.15	1	0,1	3	0,45	2	0,3
Якість продукції	0.3	1	0,3	3	0,9	2	0,6
Запропонований асортимент	0.35	1	0,35	2	0,7	3	1,05
	1.0	x	1,35	x	2,45	x	2,15

Таблиця 5.3 – Матриця SWOT- аналізу

Сильні сторони (5-6)	Слабкі сторони (5-6)
Кваліфікований персонал Сучасні технології виробництва Сучасне обладнання	Слабо налагоджена збутова мережа Немає власного сайту, мало інформації в інтернеті, низький рівень довіри до бренду Слабо налагоджений зв'язок з споживачами Достатньо високий рівень витрат Достатньо вузька лінійка асортименту продукції
Можливості (5-6)	Загрози (5-6)
Зростання попиту на більш якісну продукцію різноманітного асортименту Широкий спектр інформаційних технологій, що дає можливість виходу компанії в онлайн Збільшується підтримка з боку держави для підприємництва, що дає можливість співпраці з іншими підприємствами	Велика конкуренція Складна економічна ситуація Подорожання сировини

Зміст і методика оцінки інноваційного потенціалу підприємства.

Таблиця 5.4 – Оцінка інноваційного потенціалу

Складові	Параметри	Коефіцієнт вагомості	Оцінка	
			бали	зважена оцінка
1. Виробничі можливості	1.1 Ступінь використання виробничої потужності		1	
	1.2. Рівень прогресивності застосованих технологій		3	
	1.3. Ступінь гнучкості виробництва		2	
Підсумкова оцінка		0,25	6	1,5
2. Кадрові можливості	2.1. Рівень кваліфікації персоналу		2	
	2.2. Ступінь готовності персоналу до змін на підприємстві		3	
	2.3. Розвиненість системи мотивації персоналу		2	
	2.4. Ступінь творчої ініціативності персоналу		3	
Підсумкова оцінка		0,15	10	1,5
3. Науково-технічні можливості	3.1. Рівень витрат на наукові розробки в собівартості товарної продукції		2	
	3.2. Рівень витрат на використання науково-технічних досягнень в собівартості товарної продукції		2	
	3.3. Рівень використання розробок		3	
	3.4. Частка персоналу, яка займається науковими розробками у загальній чисельності персоналу		3	
Підсумкова оцінка		0,2	10	2
4.Маркетингові можливості	4.1. Раціональність використання каналів розподілу товарів		1	
	4.2. Гнучкість цінової політики		2	
	4.3. Рівень використання реклами		0	
	4.4. Ефективність системи збуту		0	
Підсумкова оцінка		0,1	3	0,3
5.Організаційні можливості	5.1.Ступінь інноваційної спрямованості організаційної структури		2	
	5.2Рівень відповідності організаційної культури інноваційному розвитку підприємства		2	
	5.3 Рівень компетенції керівників		3	
	5.4. Розвиненість системи інформаційного забезпечення		1	
Підсумкова оцінка		0,1	8	0,8

6. Фінансові можливості	6.1. Коефіцієнт абсолютної ліквідності	12,7	
	6.2. Коефіцієнт швидкої ліквідності	362,5	
	6.3. Коефіцієнт загальної ліквідності	838,8	
	6.4. Фінансова стійкість підприємства	120848	
Підсумкова оцінка		0,2	

Зміст і методика формування маркетингової програми підприємства.

Визначаємо перелік вирішуваних завдань та їх вплив на показники економічної ефективності.

Таблиця 5.5 – Перелік вирішуваних завдань та їх вплив на показники економічної ефективності

Статті змін	Очікуване джерело економії	Кількісна оцінка
Частка браку продукції	Стабілізація струму живлення термоелектричного теплового насосу рекуператора термокамери	Умовно постійна браку продукції: до автоматизації – 8% після автоматизації – 1%
Витрати електроенергії		Умовно постійна добова норма витрат електроенергії: до автоматизації – 85 кВт год/т після автоматизації – 70 кВт год / т

Визначаємо додатковий обсяг виробництва продукції після впровадження модернізації системи управління, враховуючі дані таблиці 5.5.

$$\Delta OV = (P_{обм} - P_{обб}) \times T \times K_{завант} \times K_{виходу}$$

де $P_{обм}$ - продуктивність після модернізації, т/добу

$P_{обб}$ - продуктивність до модернізації, т/добу

T - час роботи, діб/рік

$K_{завант}$ – коефіцієнт завантаження обладнання, приймаємо рівним 0,9.

$K_{виходу}$ – коефіцієнт виходу - 0,6.

$$\Delta OV = (0,99 - 0,92) \times 330 \times 0,9 \times 0,6 = 12,5 \text{ т}$$

Розраховуємо додатковий прибуток за рахунок збільшення продуктивності:

$$\Delta П = \Delta OV \times Ц \times Р$$

де ΔOB – додатковий обсяг реалізованої продукції, т

Π - ціна реалізації продукції, грн./т

P – рентабельність продукції (при умові заданого прийнятного рівня).

$$\Delta\Pi = 12,5 \cdot 150000 \cdot 0,25 = 412\,000 \text{ грн}$$

Розраховуємо зміну річних поточних витрат при експлуатації базової та нової моделі системи управління. Розрахунок виконують тільки по статтям і витратам, які змінюються при переході від базового варіанту до нового.

Таблиця 5.6 – Зміна річних поточних витрат

№ п/п	Статті витрат	Позначення	Величина, тис грн		Відхилення. + збільшення - зменшення
			до модерніз.	після модерніз.	
1	Витрати на електроенергію, тис.гр		172507	142065	-30442
2	Витрати на поточний і капітальний ремонт, тис.грн		4500	18153	+13653
3	Витрати на амортизацію, тис.грн		10800	43576	+32776
4	Витрати на сировину		12000	1500	-10500
5	Всього поточних витрат, тис.грн	Вп	199, 807	204, 294	ΔB_{Π} 3487

Розраховуємо повну собівартість виробленої продукції C_6 до модернізації, тис. грн.

$$C_6 = OB_6 \times \Pi_6 \times 100 / (100 + P)$$

де: P – рентабельність виробленої продукції

$$C_6 = 303,6 \times 150000 \times 100 / (100 + 25) = 36\,432\,000$$

Повна собівартість виробленої продукції після модернізації розраховуємо за фор-мулою:

$$C_H = C_6 + \Delta OB \times \Pi \times 100 / 115 + \Delta B_{\Pi}$$

де: ΔB_{Π} – зміна поточних витрат від модернізації обладнання, тис. грн.

$$C_H = 36\,432\,000 + 12,5 \cdot 150000 \cdot 100 / 125 + 3487 = 37\,935\,487$$

Таблиця 5.7 – Розрахунок показників виробничої діяльності підприємства

№			АСУТП	Зміна
---	--	--	-------	-------

п\п	Показник	Позна-чення	Базова	Модерні-зована	статей витрат (+) зростання; (-) зниження
1	Обсяг виробництва продукції, нат. од.	ОВ	303,6	316,1	+12,5
2	Дохід від реалізації, тис.грн.	ТП	45 540, 000	47 415, 000	+1 875, 000
3	Повна собівартість продукції, тис. грн.	С	36 432, 000	37 935, 487	+1 503, 487
4	Прибуток, тис. грн.	П	11 385, 000	11 853, 750	+468, 750
5	Податок на прибуток	Ппр	2 049, 300	2 133, 675	+84, 375
6	Чистий прибуток, тис. грн.	ЧП	9 335, 700	9 720, 075	+384, 375
7	Рентабельність %	Рп	25,6	25,6	

Зміст і методика визначення інноваційного бюджету та інвестицій у виробництво.

Таблиця 5.8 – Кошторис витрат на проведення прикладних НДР

Найменування статей витрат	Сума витрат, тис. грн
1. Матеріали	15,000
2. Паливо та енергія	2,000
3. Заробітна плата (основна і додаткова)	29,960
4. Відрахування на соціальні заходи	11,235
5. Амортизаційні відрахування	5,250
6. Інші витрати	6,344
7. Накладні витрати	34,894
Разом	104, 684

Таблиця 5.9 – Розмір інноваційного бюджету

Стаття витрат	Сума, грн.	Питома вага статті, %
1. Вартість проведення прикладних науково-дослідних робіт (Вндр)	104 684,25	23,8
2. Прибуток (П)	20,936	4,76
3. ПДВ	20,936	4,76
4. Договірна ціна НДР (Цндр)	146, 547	
5. Повна вартість роботи, виконаної власними силами	293, 095	66,6
Розмір інноваційного бюджету	439, 643	100

Таблиця 5.10 – Інвестиційні витрати на модернізацію системи управління технологічним процесом

№	Статті витрат	Сума, тис.грн.
---	---------------	----------------

1	Витрати для виконання робіт з проектування	439, 643
2	Бюджет маркетингових заходів по просуванню	-
3	Вартість комплексів засобів автоматизації (ІСкап)	19,980
4	Витрати для модернізації діючої системи управління (ІС мод)	3,627
5	Всього інвестиційні (ІС)	463,25

Розрахунки:

$$ІС \text{ мод} = ІС_{\text{сперб}} * Н_{\text{мод}} / 100 = 18153 * 20\% / 100 = 3627$$

Зміст і методика оцінки інвестиційної привабливості інноваційного проекту.

Таблиця 5.11 – Величина щорічних виплат відсотків за кредитом, тис. грн.

Роки	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Сума кредиту, тис. грн.	450,000	360, 000	270, 000	180, 000	90, 000
Величина відсотків за кредитом, тис. грн.	112,500	90, 000	67, 500	45, 000	22, 500
Щорічна сума виплат за кредитом	202,500	180, 000	157, 500	135, 000	112, 500
Залишок кредиту на кінець року	360, 000	270, 000	180, 000	90, 000	0

Таблиця 5.12 - Оцінка інвестиційної привабливості інноваційного проекту.

Показники	Роки				
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й
Виручка від реалізації	47 415, 000	47 415, 000	47 415, 000	47 415, 000	47 415, 000
Поточні витрати	204, 294	204, 294	204, 294	204, 294	204, 294
Амортизаційні відрахування	43, 576	43, 576	43, 576	43, 576	43, 576
Відсотки за кредит	112, 500	90, 000	67, 500	45, 000	22, 500
Оподаткований прибуток	11,853750	11,853750	11,853750	11,853750	11,853750
Податок на прибуток	2 133, 675	2 133, 675	2 133, 675	2 133, 675	2 133, 675
Чистий прибуток	9 720, 075	9 720, 075	9 720 075	9 720, 075	9 720, 075
Чистий прибуток після виплат за кредит	9 517, 572	9 540, 072	9 562, 572	9 585, 072	9 607, 572
Чисті грошові надходження	9 763, 651	9 763, 651	9 763, 651	9 763, 651	9 763, 651
Коефіцієнт дисконтування	0,567426	0,635518	0,71178	0,797193	0,892857
Чистий приведений дохід накопичуванням підсумком	9 300,4	19064,05	28 827,7	38 591,3	48 355

5.5 Висновки за розділом

В ході виконання розділу на базі доступного апаратного та програмного забезпечення (BeagleBone Black + CodeSys V3.5) отримали ПЛК з відкритою архітектурою та підтримкою інтерфейсів UART, I2C, SPI, USB2.0, mini-USB, Ethernet, HDMI, 7AI, 45DI/DO, PWM.

Попередньо алгоритм системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів був розроблений, оптимізований та протестований в середовищі Matlab Simulink, а після переведений з «безперервного» часу в «цифровий». Переконавшись в працездатності отриманого «цифрового» алгоритму конвертували у програмний код у вигляді структурованого тексту для подальшої його реалізації у середовищі програмування CodeSys V3.5.

З використанням підготовленого коду розроблено програмне забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом гарячого копчення ковбас, а також людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога у вигляді веб-візуалізації.

Також, в ході виконання розділу проведено оцінку економічної ефективності впровадження розробок. Основні результати:

Чистий приведений дохід

$$\text{ЧПД} = - + \sum_{i=1}^n \frac{d \text{ ЧГН}_i}{(1 + IC)^i} = 5\,493,84 - 844,708 = 4\,649,132$$

Індекс доходності

$$ID = \frac{IC \cdot d \text{ ЧГН}_n}{\sum_{i=1}^n \frac{d \text{ ЧГН}_i}{(1 + IC)^i}} = 9\,763,651 / 463,25 = 21$$

Термін окупності

$$TOI = 463,25 / 9\,763,651 = 0,047$$

Виробничі, кадрові, науково-технічні, маркетингові можливості підприємства на достатньому рівні, трішки гірші організаційні можливості. Але це обумовлює перспективи для їх розвитку. В цілому, підприємство має достатній інноваційний потенціал.

Реалізація проєкту є доцільною, строк окупності інвестицій буде у межах прийнятого терміну фінансової оцінки проєкту TOI складає 0,047 періоду(року), ID=21.

ВИСНОВОК

При розробці АСК процесу камерою варки та гарячого копчення ковбас потоці з використанням термоелектричного теплового насосу на базі мікропроцесорної техніки, головним завданням якої буде досконалий контроль та керування процесом, потрібно підтримувати температуру переохолодження повітря $T_{гнв}$ та догрівання повітря $T_{гс}$. Для цього необхідно буде обрати сучасні засоби керування, розробити САР з високою якістю регулювання, а також скласти досконалі алгоритми керування.

У середовищі імітаційного моделювання MATLAB здійснювалася розробка моделі як об'єкта керування. Були отриманні перехід та квазістатичні характеристики моделей та обґрунтована їх адекватність об'єкту. Також проведено ідентифікацію математичних моделей динаміки каналів ОК. Усі канали ОК мають статичні властивості. Параметричну ідентифікацію проведено за методиками двох загальних точок для 1-го та 2-го порядку.

Сформульовано гранично-припустимі вимоги до якості регулювання тиску в ресивері та температур вина у випарнику та конденсації алкоголю.

Синтез САР проведено в два етапи. На першому етапі розрахунок налаштувань регулятора проводився за інженерними методиками Копеловича, а на другому етапі було застосовано оптимальний параметричний синтез. В якості критерію використано інтегральний модульний критерій. В якості базового алгоритму регулювання будемо використовувати ПД-алгоритм. Основним шляхом підвищення динамічної точності в даному випадку обрано побудову автономної САР.

В основу підвищення динамічної точності САР було покладено принцип інваріантності Петрова, сутність якого у введенні додаткових каналів впливу через коригувальний зв'язок.

Було виведено передатну функцію коригуючого зв'язку, приведено її до фізично реалізуємого виду та представлено у виді типових динамічних ланок. Оскільки передатна функція містить ланку чистого запізнення вона є фізично реалізуємою.

Після спрощення коригуючого зв'язку вибрано початкові наближення його параметрів з їх подальшою оптимізацією. Розроблено схему моделювання САР підвищеної динамічної точності для оптимального параметричного синтезу коригуючого зв'язку.

Було проведено порівняльний аналіз САР базової структури та САР ПДТ. Суттєве зменшення інтегральних показників якості, максимального динамічного відхилення та часу регулювання свідчить про те що САР ПДТ є більш якісною в порівнянні з САР базової структури.

В процесі виконання роботи була розроблена модель САР 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 САР функціонує можливо трішки краще, ніж САР з традиційним ПД-регулятором при об'єкті управління з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання.

Для подальшої реалізації параметричної оптимізації САР за характеристиками нечіткого регулятора було виконано тренування визначеної штучної нейронної мережі, яка може виконувати роль нейрорегулятора. Була розроблена модель САР з регулятором, що є штучною нейронною мережею. Параметрична оптимізація САР з нейрорегулятором була проведена за тих же умов, що і САР з традиційним ПД-регулятором.

У результаті моделювання різних САР було встановлено, що за якістю регулювання САР з нейрорегулятором функціонує незначно краще, ніж інші САР, це за інтегральним показником якості регулювання відповідно 170,9 при САР з нейрорегулятором і 178 при САР з традиційним ПД-регулятором. Середнє квадратичне відхилення регульованої зміни від заданого значення, при випадкових впливах, що збурюють, відрізняється: при САР з традиційним ПД-регулятором 4,5 а при САР з нейрорегулятором 2,3.

Таким чином, на основі виконаного синтезу і аналізу різних САР 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.

Найчастіше на змінні об'єкта керування регламентами накладаються обмеження, порушення яких може мати дуже несприятливі наслідки. Вони можуть призводити до аварійних зупинок обладнання, втрат сировини та енергоносіїв, зниження якості продукції, необхідність мати великий штаб персоналу та ремонтних служб. Ситуація посилюється, якщо найбільш ефективні режими роботи ОУ близькі до гранично-допустимих, ОУ є суттєво нестационарним, схильний до інтенсивних неконтрольованих збурень, має запізнення в каналах управління, а наслідки порушень тяжкі.

Для процесу гарячого копчення ковбас функція ефективності знаходиться за межами регламенту і задача підвищення продуктивності та ефективності вимагає від нас наближення до верхнього обмеження без його порушення. Для реалізації функції максимізації продуктивності та енергоефективності роботи ОК з гарантованою відсутністю викидів за верхню межу було розроблено СГК з розрахунком допустимого заданого значення контуру регулювання безпосередньо за моделлю порушення регламенту. З початковими налаштуваннями параметрів СГК кількість викидів за верхню межу дорівнювала 1, але після їх оптимізації кількість викидів дорівнювала 0. Після порівняльного аналізу роботи САК базової структури, САК ПДТ та САК СГК можна зробити наступні висновки: СГК є більш енерго ефективною і, водночас, більш якісною, гарантуючи максимальне наближення до граничної межі, але при цьому не перетинаючи її – дотримуючись регламенту.

В ході виконання розділу на базі доступного апаратного та програмного забезпечення (BeagleBone Black + CodeSys V3.5) отримали ПЛК з відкритою архітектурою та підтримкою інтерфейсів UART, I2C, SPI, USB2.0, mini-USB, Ethernet, HDMI, 7AI, 45DI/DO, PWM.

Попередньо алгоритм системи гарантуючого керування процесом каталітичної очистки інертних газів був розроблений, оптимізований та протестований в середовищі Matlab Simulink, а після переведений з

«безперервного» часу в «цифровий». Переконавшись в працездатності отриманого «цифрового» алгоритму конвертували у програмний код у вигляді структурованого тексту для подальшої його реалізації у середовищі програмування CodeSys V3.5.

З використанням підготовленого коду розроблено програмне забезпечення для реалізації алгоритму системи гарантуючого керування процесом гарячого копчення ковбас, а також людино-машинного інтерфейсу оператора-технолога у вигляді веб-візуалізації.

Також, в ході виконання розділу проведено оцінку економічної ефективності впровадження розробок. Основні результати:

Чистий приведений дохід

$$\text{ЧПД} = - + \sum_{i=1}^n \frac{\text{ЧГН}_i}{(1 + \text{IC})^i} = 5\,493,84 - 844,708 = 4\,649,132$$

Індекс доходності

$$\text{ІД} = \frac{\text{ЧПД}}{\sum_{i=1}^n \frac{\text{ЧГН}_i}{(1 + \text{IC})^i}} = \frac{4\,649,132}{219,463,25} = 21$$

Термін окупності

$$\text{ТОІ} = \frac{463,25}{219,463,25} = 0,047$$

Виробничі, кадрові, науково-технічні, маркетингові можливості підприємства на достатньому рівні, трішки гірші організаційні можливості. Але це обумовлює перспективи для їх розвитку. В цілому, підприємство має достатній інноваційний потенціал.

Реалізація проєкту є доцільною, строк окупності інвестицій буде у межах прийнятого терміну фінансової оцінки проєкту ТОІ складає 0,047 періоду(року), ІД=21.

ЛІТЕРАТУРА

1. Хобін В. А. Конспект курсу лекцій по дисципліні «Ідентифікація і моделювання об'єктів автоматизації». Одеса-2008 р.
2. Хобін В. А. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з курсу «Ідентифікація і моделювання технологических объектов», Одеса-2000 г.
3. Конспект курсу лекцій з дисципліни “ Теорія автоматичного управління ” (частина І)– Хобін В.А. ОНАХТ. Одеса – 2012 г.
4. Конспект курсу лекцій з дисципліни “ Теорія автоматичного управління ” (частина ІІ)– Хобін В.А. ОНАХТ. Одеса – 2012 г.
5. Методичні вказівки до виконання та оформлення курсової роботи з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для студентів спеціальностей 2105 денної та заочної форм навчання / Укл. В.А. Хобін, - Одеса: ОТІПП, 1992 г. – 15 с.
6. Конспект лекцій з курсу „Автоматизація технологічних процесів та виробництв” для студентів напряму підготовки бакалаврів 6.050202 „Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології” всіх форм навчання / Укл. Л.М.Сичук, І.М.Світій. – Одеса: ОНАХТ, 2013. – 88 с.
7. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з курсу "Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації " для бакалаврів 6.050202 денної та заочної форм навчання / Укл.: В. М. Левінський, А.І. Павлов, М.Т. Степанов. – Одеса: ОНАХТ, 2011г. – 13.с
8. CODESYS Control for BeagleBone SL | CODESYS Store International - <https://store.codesys.com/en/codesys-control-for-beaglebone-sl.html>
9. Терморегулятори BeagleBone Black, конфігурація штифтів, особливості та застосування (microcontrollerslab.com) - <https://microcontrollerslab.com/beaglebone-black-pinout-pin-configuration-features-applications/>
10. PowerPoint-Präsentation (codesys.com) <https://www.codesys.com/fileadmin/data/Images/Download/CODESYS-Features-Improvements-lv.pdf>

11. BeagleBone Black — BeagleBoard Documentation -
<https://docs.beagleboard.org/latest/boards/beaglebone/black/index.html>
12. Beagleboard:BeagleBoneBlack Debian - eLinux.org -
https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#U-Boot_Overlays
13. Setting Up the BeagleBone Black's GPIO Pins (vadl.github.io) -
<https://vadl.github.io/beagleboneblack/2016/07/29/setting-up-bbb-gpio>
14. Модельно-орієнтоване проектування програмного забезпечення для вбудовуваних систем в середовищі Matlab/Simulink. Топораш Г.К., Мазур А.В, Ковальчук Д. А., Пушкін А.А. Одеська Національна Академія Харчових Технологій, м. Одеса, 2014. Available:
https://www.researchgate.net/publication/307758793_Modelno-orientirovannoe
15. projektirovanie_programmnogo_obespecenia_dla_vstraivaemyh_sistem_v_s_rede_MatlabSimulink.
16. Кодер ПЛК Simulink - MATLAB (mathworks.com)
<https://www.mathworks.com/products/simulink-plc-coder.html>
17. Simulink PLC Coder(TM) Import (codesys.com)
<https://us.store.codesys.com/simulink-plc-coder-import.html>
18. Simulink PLC Coder Import — Product Data Sheet V0.0.0.1 (codesys.com)
https://us.store.codesys.com/media/n98_media_assets/files/000062-F/2/Simulink%20PLC%20Coder%20Import_en.pdf
19. Генерація коду - MATLAB і Simulink (mathworks.com)
https://www.mathworks.com/help/overview/code-generation.html?s_tid=hc_product_group_bc
20. Кодер ПЛК Simulink Документації (mathworks.com)
https://www.mathworks.com/help/plccoder/index.html?s_tid=hc_product_card
21. Обмеження на генерацію структурованого текстового коду - MATLAB і Simulink (mathworks.com) <https://www.mathworks.com/help/plccoder/ug/structured-text-code-generation-limitations.html>
22. <https://www.geoteplo.com.ua/public/66-how-it-work.html>

23. <https://nse.com.ua/ru/Статьи/principle-heat-pump-air-to-water.html>
24. <https://elementum.com.ua/blog/princip-raboty-teplovogo-nasosa>
25. <http://www.burservice.com.ua/1>
26. БОЙКО, Валентин Семенович, et al. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: підручник, книга 3.
27. DISALVO, Francis J. Thermoelectric cooling and power generation. Science, 1999, 285.5428: 703-706.
28. [Иоффе А. Ф.](#) Полупроводниковые термоэлементы. — М.-Л.: Из-во АН СССР, 1960. — 188 с. (рос.)
29. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник / Анатычук Л. И. — К.: [Наукова думка](#), 1979. — 768 с. (рос.)
30. Вайнер А. Л. Каскадные термоэлектрические источники холода. — М.: Советское радио, 1976. — 137 с. (рос.)
31. Теплообмін; Теплопередача // [Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури](#) / Р. А. Шмиг, В. М. Боярчук, І. М. Добрянський, В. М. Барабаш ; за заг. ред. Р. А. Шмига. — Львів, 2010. — С. 189. — [ISBN 978-966-7407-83-4](#).
32. [ТЕПЛООБМІН](#) [[Архівовано](#) 9 березня 2016 у [Wayback Machine](#).] // [Фармацевтична енциклопедія](#)

УДК 681.5.01 : 637.524 : 621.577

АВТОМАТИЗАЦІЯ ГАРЯЧОГО КОПЧЕННЯ КОВБАС В УНІВЕРСАЛЬНІЙ ТЕРМЛКАМЕРІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСУ AUTOMATION OF HOT SMOKING OF SAUSAGES IN A UNIVERSAL THERMAL CHAMBER USING A THERMOELECTRIC HEAT PUMP

Петренко Д.С.

Petrenko D. S.

Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

ORCID 0000-0002-7739-5755

Email dmytropetrenko00@gmail.com

Анотація Важливим сегментом м'ясопереробної галузі є виробництво ковбасних виробів. При цьому одним з основних технологічних процесів є термічна обробка продукту. Копчення ковбас проводять, зокрема, в універсальних термокамерах. Точне дотримання регламенту копчення можливе лише при автоматичному управлінні процесом. Автоматизація копчення ковбас є актуальним завданням. Відомі рішення в цьому напрямку мають загальні недоліки. В одеському національному у технологічному університеті, на кафедрі автоматизації технологічних процесів та робототехнічних систем в рамках випускної роботи магістранта запропоновано ефективну систему автоматичного керування копченням ковбас з використанням термоелектричного теплового насосу. Зокрема проаналізовано технологічний процес, побудовано параметризовану, параметричну та структурну схеми. Розроблено моделі лабораторної установки. Проведено ідентифікацію моделей каналів перетворення дій, параметричний та оптимальний синтез САР температури переохолодженого та гарячого повітря з ПІ та ПІД алгоритмами регулювання. Складено алгоритми пуску-зупинки системи нагрівання повітря в штатному та аварійному режимах, розроблено функціональну логічну схему. Здійснено вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів. Технічну структуру системи управління розроблено на базі контролера ОВЕН ПЛК 160. Проведено розробку контролерно-комп'ютерної мережі та програмування алгоритмів регулювання та логічного керування САК. В середовищі SCADA-системи WinCCFlexible розроблено програмне забезпечення АРМ оператора-технолога процесу термічної обробки ковбасних виробів в універсальній термокамері. Розроблено фрагменти проектної документації.

Abstract. An important segment of the meat processing industry is the production of sausage products. At the same time, one of the main technological processes is heat treatment of the product. Sausages are smoked, in particular, in universal thermal chambers. Exact compliance with smoking regulations is possible only with automatic process control. Sausage smoking automation is an urgent task. Known solutions in this direction have general drawbacks. In the Odessa National University of Technology, at the Department of Automation of Technological Processes and Robotic Systems, an effective automatic control system for smoking sausages using a thermoelectric heat pump was proposed as part of the master's thesis. In particular, the technological process was analyzed, a parameterized, parametric and structural scheme was constructed. A model of a laboratory installation has been developed. Identification of models of action conversion channels, parametric and optimal synthesis of supercooled and hot air temperature SAR with PI and PID regulation algorithms was carried out. Algorithms for starting and stopping the air heating system in normal and emergency modes have been compiled, and a functional logic scheme has been developed. The selection of technical means of obtaining information about process variables and implementation of controlling influences was made. The technical structure of the control system was developed on the basis of the OVEN PLK 160 controller. The development of the controller-computer network and programming of regulation algorithms and logical control of the SAC was carried out. In the WinCCFlexible SCADA system, the software of the operator-technologist of the process of thermal processing of sausage products in the universal thermal chamber has been developed. Fragments of project documentation have been developed.

Ключові слова: ковбасні вироби, копчення, універсальна термокамера, термоелектричний тепловий насос, автоматичне управління, автоматизація.

Key words: sausage products, smoking, universal thermal chamber, thermoelectric heat pump, automatic control, automation.

Вступ

М'ясна галузь – це одна з найважливіших та найбільших галузей у структурі харчової промисловості та для забезпечення продовольчої безпеки України. Включення в раціон харчування людини високоякісної та доступної продукції [тваринного походження](#), зокрема м'яса худоби та птиці, на сьогодні є пріоритетним завданням державної політики країни.

Основне завдання м'ясної галузі – комплексна переробка худоби та птиці. Одним з провідних в цій галузі є сегмент виробництва ковбасних виробів. Його частка в Україні складає 14,5% від загального обсягу всієї продукції м'ясопереробної галузі і 30% від загального обсягу готової м'ясної продукції. Ковбасна продукція знаходиться на четвертому місці в шкалі продуктів, що користуються постійним попитом у населення, поступаючись молочним продуктам, фруктам та овочам і хлібобулочним виробам.

Ковбасні вироби є важливою складовою харчування українців, навіть більше, – ковбаса традиційно використовується в українській кулінарії. Окрім цього, дана група товарів входить до переліку мінімального «споживчого кошика». Скорочення купівельної спроможності населення останнім часом спонукає до споживання ковбасних виробів як замінильника більш дорогого м'яса.

Рівень споживання ковбасних виробів є свого роду індикатором добробуту нації. Український ринок м'ясних та ковбасних виробів відрізняється низкою особливостей. Ринок майже досяг свого насичення, жорстка конкуренція визначає асортимент, якість та регулює цінову політику. Певний надлишок ковбасних виробів у магазинах великих торгових роздрібних мереж примушує виробників випускати «орендовані» продукти високої якості, шукати нові ніші та створювати інноваційну продукцію. Специфікою ринку м'ясних виробів є його залежність від сировини та якості її обробки.

При виробництві м'ясних та ковбасних виробів одним з основних технологічних процесів є термічна обробка продукту, яка включає варку та гаряче копчення. Термічна обробка ковбасних виробів проводиться в спеціальних термічних камерах або шафах, які можуть бути призначені для окремого технологічного процесу, або бути універсальними поєднуючи термічну обробку всіх необхідних видів.

Технологічний процес приготування ковбасних виробів в універсальній термокамері умовно можна поділити на два етапи: копчення та варка. Для обох випадків задля забезпечення отримання продукту високої якості, важливим є дотримання заданих температурних режимів та вологості теплоносія. В якості теплоносія може виступати повітря, пара, пароповітряні суміші, вода та ін.

Для приготування пароповітряної суміші заданої температури та вологості доцільно повітря спочатку переохолоджувати. Тоді зайва волога конденсується і тим самим відносна вологість доводиться до 100%. Переохолодивши повітря і потім догрівши його до необхідної температури отримаємо пароповітряну суміш з визначеною температурою та відносною вологістю. Температура переохолодження та температура догрівання складають основу технологічного регламенту.

Розроблений технологічний регламент служить основою: а) розробки термокамери, в якій буде реалізовано технологічний процес; б) розробки системи автоматичного керування технологічним процесом при його реалізації у виробничих умовах.

Точне дотримання технологічного регламенту можливе лише за умови високоефективного управління технологічним процесом, що забезпечується використанням автоматичних систем управління. Тому актуальним є автоматизація процесу варки та гарячого копчення ковбас в універсальній термокамері.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Питанням автоматизації термічної обробки ковбас в універсальній термокамері займалося чимало дослідників. Так Світій І. М. Науменко А. С. запропонували спосіб автоматичного керування процесом копчення ковбаси у копильній камері, який містить контроль і регулювання температури в копильній камері шляхом зміни подачі гріючої пари, тиску пари і води в трубопроводах шляхом зміни їх подачі, а також густини диму в камері шляхом зміни його подачі в камеру, програмне керування циклом гарячого і холодного копчення [1]. Автори іншого патенту на винахід запропонували спосіб автоматичного керування процесом копчення ковбаси, в якому величину рН визначають безпосередньо під час процесу копчення за допомогою іоноселективних електродів [2]. Дослідники компанії Drevos запропонували спосіб автоматичного керування універсальною копильнею для холодного та гарячого копчення, який містить регулювання температури в копильній камері шляхом зміни потужності нагрівальних електричних елементів [3]. Дослідники компанії Craftstore розробили систему автоматичного керування термокамерою, яка містить регулювання температури в камері шляхом зміни електричної потужності нагрівального елемента [4]. [Віннікова Л. Г.](#) та інші запропонували спосіб управління обжарюванням ковбас зміною витрат димової суміші [5]. Асуляк А. В. та інші запропонували спосіб управління обжарюванням ковбас також зміною витрат димової суміші [6]. Трішин Ф. А. та Ніколайчук С. ю. запропонували спосіб автоматичного управління процесом термічної обробки ковбасних виробів у термічній камері, що включає вимірювання температури в камері та підтримання її на заданому значенні зміною витрат пари, з компенсацією контрольованого збурення [7]. Гробер М. С. запропонував спосіб управління термокамерою, який містить регулювання температури в камері шляхом зміни потужності панельного калорифера [8]. Також розробниками компанії ОВЕН запропоновано спосіб автоматичного керування процесом гарячого копчення продукту в універсальній термокамері, який містить регулювання температури в камері шляхом зміни потужності термоелектропелетворювача (ТЕП), а також регулювання відносної вологості димоповітряної суміші в камері шляхом зміни потужності ТЕП [9]. Однак всі розглянуті рішення мають спільні недоліки, а саме одночасно не здійснюють регулювання температури та відносної вологості в термокамері, а також при їх використанні в термокамері накопичується зайва волога, що призводить до низької ефективності процесу термічної обробки ковбасних виробів та їх низької якості. В одеському національному у технологічному університеті, на кафедрі автоматизації технологічних процесів та робототехнічних систем в рамках випускної роботи бакалавра

запропоновано систему автоматичного управління гарячим копченням ковбас в універсальній термокамері з використанням термоелектричного теплового насосу, в якій вирішено ці питання [10].

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності керування гарячим копченням ковбаси з використанням термоелектричного теплового насосу шляхом розробки ефективної системи автоматичного керування процесом гарячого копчення ковбаси в універсальній термокамері, яка забезпечила б підтримку значень регульованих змінних в регламентних зонах як в сталих, так і в перехідних режимах.

Для досягнення цієї мети було вирішено наступні задачі:

- здійснення аналізу процесу варки та гарячого копчення ковбаси в термокамері як об'єкту керування, обґрунтування доцільності та шляхів підвищення ефективності керування процесом;
- Конкретизація задачі дотримання регламентів керування технологічним процесом варки та гарячого копчення ковбаси, розробка і реалізація комплексу його моделей як об'єкта регулювання;
- Розробка і параметрична оптимізація алгоритмів керування технологічним процесом варки та гарячого копчення ковбаси, порівняльний аналіз системи автоматичного регулювання (САР), отримання цифрових аналогів обраних алгоритмів в середовищі CoDeSiS;
- Конкретизація задачі і розробка алгоритмів логічного керування процесом варки та гарячого копчення ковбаси;
- Вибір сучасних технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів;
- Розробка контролерно-комп'ютерної мережі, програмування алгоритмів регулювання та логічного керування процесом варки та гарячого копчення ковбаси;
- Розробка SCADA-системи для автоматизованого робочого місця технолога і наладчика системи автоматичного керування (САК) процесом варки та гарячого копчення ковбаси;
- Розробка фрагментів документації технічного забезпечення САК процесом варки та гарячого копчення ковбаси, включаючи питання охорони праці;
- Попереднє обґрунтування економічної доцільності реалізації розробленої САК процесом варки та гарячого копчення ковбаси.

Методи і матеріали досліджень

Основним методом проведеного дослідження був метод системного аналізу. Для ідентифікації моделей об'єкту було використано такі методи: математичного аналітичного моделювання активного експерименту, пасивного експерименту, типової статистичної ідентифікації та інженерні методики ідентифікації моделей об'єкту керування[11]. При синтезі системи автоматичного регулювання було використано методи теорії автоматичного керування, а саме інженерні методики параметричного та оптимального синтезу[12] методи нечітких множин та нейронних мереж, методи теорії гарантуючого керування. Основним експериментальним методом обрано метод імітаційного моделювання

Результати досліджень

На початку було проведено аналіз технологічного процесу, реалізованого в універсальній термокамері.

Суть технологічного процесу термічної обробки (жарки) ковбас в універсальній термокамері полягає в перетворенні ковбасних напівфабрикатів під впливом теплоносія (повітря) з фіксованою температурою та вологістю у готовий ковбасний виріб (рис.1).

Було складено технологічний регламент та проведено аналіз наслідків виходу технологічних і експлуатаційних параметрів за регламентні допуски. Як регламентні обрано температуру $T_{гнв}$ та $T_{гс}$.

Проведено формалізацію параметризованої схеми технологічного процесу і отримано його параметричну схему (рис.2).

Здійснено конкретизацію мети і завдань керування об'єктом, виявлено регульовані координати.

Наступним кроком була розробка структурної схеми об'єкта керування (рис.3) та виділено задачі регулювання

Далі було розроблено моделі лабораторної установки для приготування ковбаси в універсальній термокамері та реалізовано в середовищі імітаційного моделювання MATLAB. Для цього було проведено **декомпозицію технологічної установки на окремі вузли і розроблено загальну структуру його математичної моделі з основними взаємозв'язками між моделями окремих вузлів лабораторної установки (рис.4)**

Було визначено регламентні зони за температурою переохолодженого повітря $T_{гнв}$ ($20^{\circ}\text{C} \pm 0.5$), та температурою гарячого сухого повітря $T_{гс}$ ($90^{\circ}\text{C} \pm 0.5$).

Було формалізовано інтегральні вимоги до перехідних та динамічно сталих процесів регулювання у формі модульного інтегрального критерію оптимальності САР.

Було обрано замкнений принцип керування і побудовано САР базової (рис. 5). Була проведена ідентифікація моделей каналів перетворення координатних дій технологічного процесу термічної обробки ковбаси. Здійснено вибір початкових наближень настроювальних параметрів ПІ та ПІД алгоритмів регулювання на основі інженерних методик параметричного (неоптимального) синтезу САР.

Було проведено оптимальний синтез САР температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$ з ПІ та ПІД регулятором.

3гс	повітря гаряче сухе
3вс	повітря відпрацьоване сухе
3гнв	повітря з нормалізованою вологістю
3з	повітря атмосферне

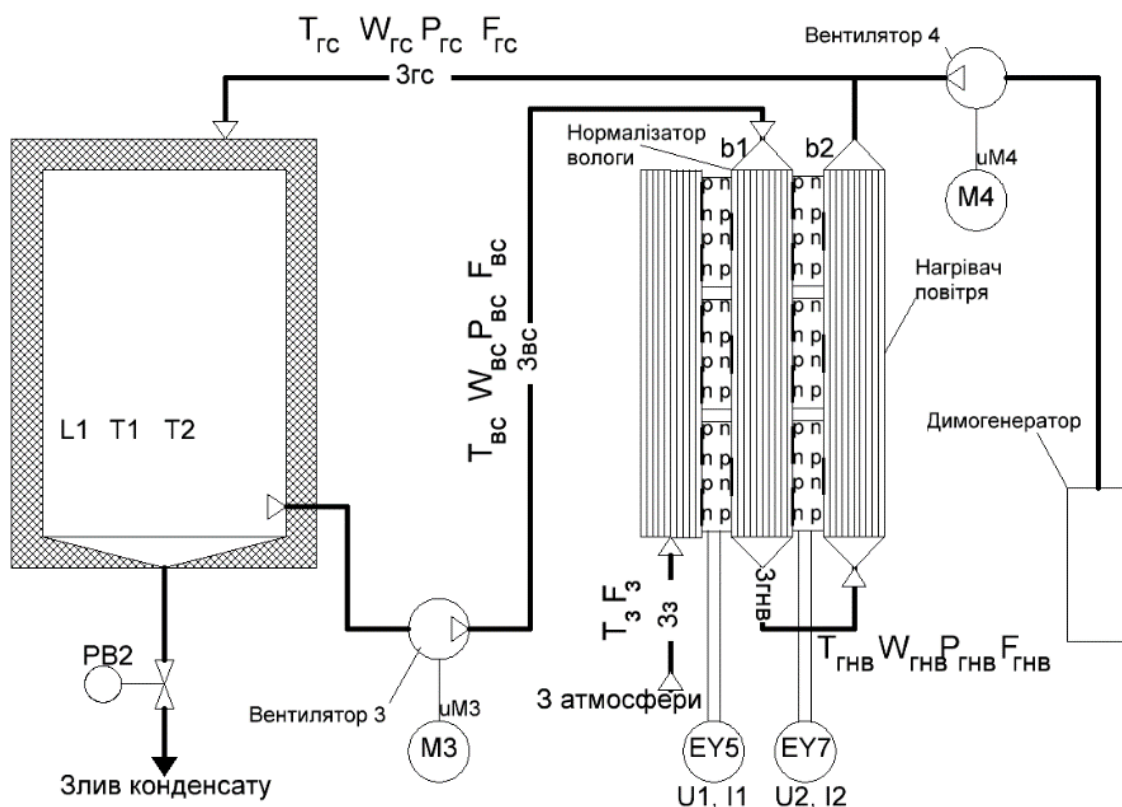


Рисунок 1. – Параметризована технологічна схема процесу

$T_{гс}$ – температура гарячого сухого повітря
 $P_{гс}$ – тиск гарячого сухого повітря
 $W_{гс}$ – вологість гарячого сухого повітря
 $F_{гс}$ – витрати гарячого сухого повітря
 $T_{вс}$ – температура відпрацьованого сухого повітря
 $P_{вс}$ – тиск відпрацьованого сухого повітря
 $W_{вс}$ – вологість відпрацьованого сухого повітря
 $F_{вс}$ – витрати відпрацьованого сухого повітря
 $T_{гнв}$ – гаряче з нормалізованою вологістю повітря
 $P_{гнв}$ – гаряче з нормалізованою вологістю повітря

$W_{гнв}$ – гаряче з нормалізованою вологістю повітря
 $F_{гнв}$ – гаряче з нормалізованою вологістю повітря
 $T_з$ – температура атмосферного повітря
 $F_з$ – витрати відпрацьованої води
 $\delta 1$ – конструкц. особливості нормалізатора вологи
 $\delta 2$ – конструкційні особливості нагрівача повітря
 $u1$ – струм живлення термоелектр. охолоджувача
 $u2$ – струм живлення термоелектричного нагрівача
 $uM3$ – робота вентилятора В3
 $uM4$ – робота вентилятора В4

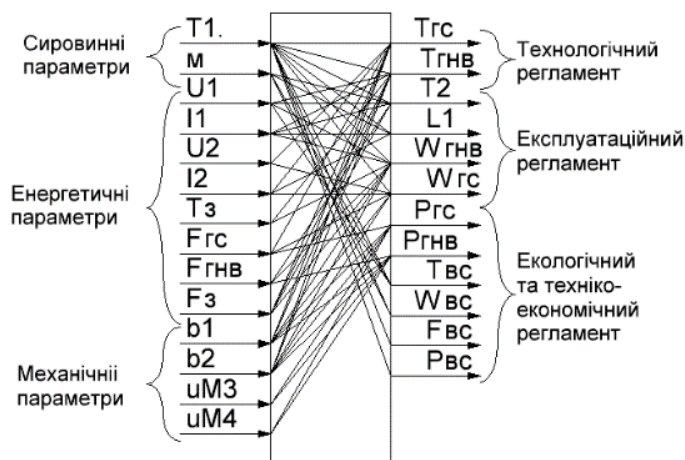


Рис. 2 – Параметрична схема процесу термічної обробки ковбаси в універсальній термокамері

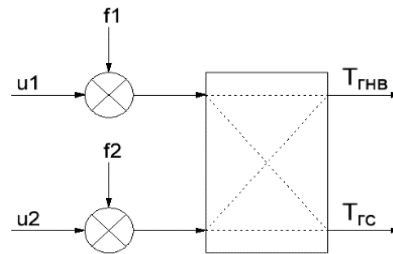


Рис 3.- структурна схема об'єкта керування.
f1, f2 – неконтрольовані збурення.

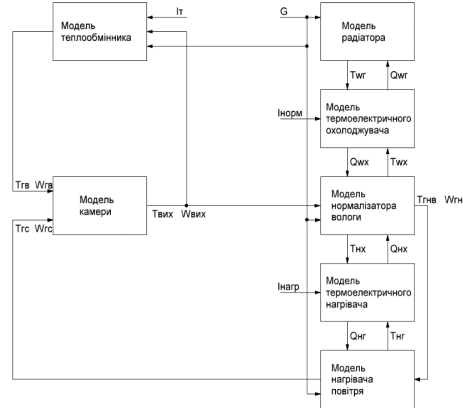


Рисунок 4. – Структурна схема моделі лабораторної установки

G – Витрати повітря
 $T_{гр}$ – Температура гарячої сторони термоохолоджувача
 $Q_{гр}$ – Тепловий потік від гарячої сторони термоохолоджувача
 $Q_{хх}$ – Тепловий потік холодної сторони термоохолоджувача
 $T_{хх}$ – Температура холодної сторони термоохолоджувача
 $T_{хг}$ – Температура холодної сторони термоелектричного нагрівача
 $Q_{хг}$ – Тепловий потік від холодної сторони термоелектричного нагрівача
 $T_{нг}$ – Температура гарячої сторони термоелектричного нагрівача
 $W_{вих}$ – Відносна вологість повітря на виході з камери

$T_{гнв}$ – Температура гарячого повітря з нормалізованою вологістю
 $W_{гнв}$ – Відносна вологість гарячого повітря з нормалізованою вологістю
 $I_{норм}$ – Струм живлення термоелектричного охолоджувача
 $I_{нагр}$ – Струм живлення термоелектричного нагрівача
 I_t – Струм живлення теплообмінника
 $T_{гв}$ – Температура гарячого вологого повітря
 $T_{гс}$ – Температура гарячого сухого повітря
 $W_{гс}$ – Відносна вологість гарячого вологого повітря
 $W_{гв}$ – Відносна вологість гарячого сухого повітря
 $T_{вих}$ – Температура повітря на виході з камери

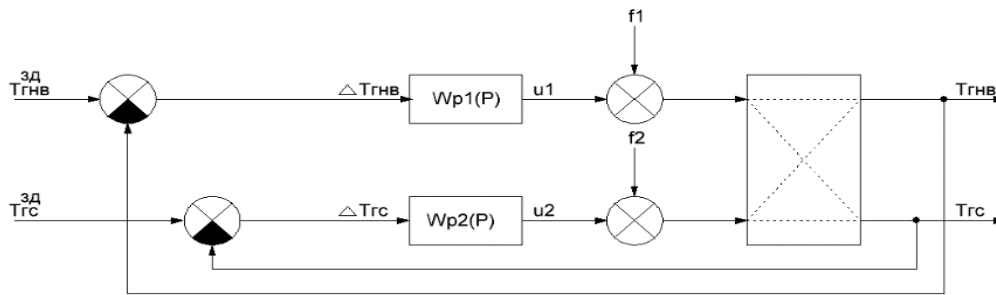


Рис. 5 – Структурна схема системи керування, що відповідає замкненому принципу керування На рисунку представлено:

- Тгнвзд - задане значення переохолодженого повітря
- $\Delta T_{гнв}$ - помилка регулювання температури переохолодженого повітря
- Тгсзд - задане значення догрітого повітря
- $\Delta T_{гс}$ - помилка регулювання температури догрітого повітря
- f1 – вектор неконтрольованих збурень
- f2 - вектор неконтрольованих збурень
- Wp1(P) – передатна функція регулятора температури переохолодження повітря
- Wp2(P) – передатна функція регулятора температури догрівання повітря

Було проведено оптимальний синтез САР температури гарячого повітря Тгс з ПІ та ПІД регулятором,

Було проведено перевірку на грубість.

Були складені регламенти функціонування та алгоритми пуску-зупинки системи нагрівання повітря в штатному та аварійному режимах, розроблена функціональна логічна схема, побудована її реалізація на ЕОМ, за допомогою середовища MATLAB.

Здійснено вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів.

Технічну структуру системи управління розроблено на базі контролера ОВЕН ПЛК 160.

Було проведено розробку контролерно-комп'ютерної мережі та програмування алгоритмів регулювання та логічного керування САК. Проведене в режимі емуляції тестування програми підтвердило правильність роботи програми, відповідно до вимог алгоритму керування

В середовищі SCADA-системи WinCCFlexible було розроблено програмне забезпечення АРМ оператора-технолога процесу термічної обробки ковбасних виробів в універсальній термокамері, яке дозволяє контролювати хід технологічного процесу, задавати режими роботи, здійснювати перемикання режимів управління обладнанням і керувати в ручному режимі окремим обладнанням, відображати динаміку зміни технологічних параметрів, вести журнали подій (рис. 6).

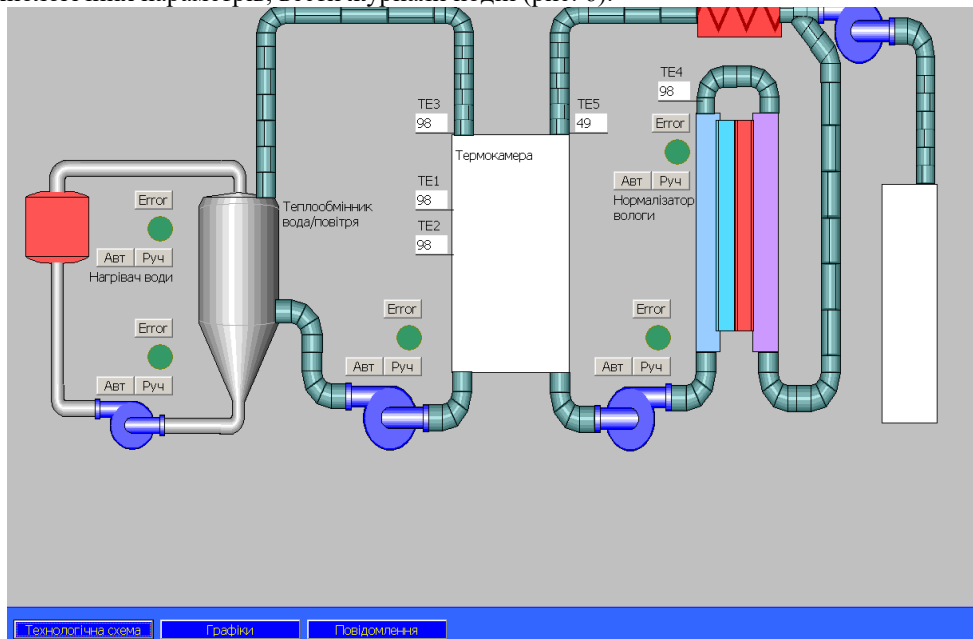


Рис. 6. – Загальний вигляд екранної форми АРМ оператора-технолога

Було розроблено фрагменти проєктної документації, а саме: схему автоматизації, принципову електричну схему контролю й керування, принципову електричну схему живлення, загальний вид щита оператора, монтажну

схему щита оператора, схему зовнішніх проводок, специфікації, пояснювальна записка.

Була обґрунтована економічна доцільність впровадження варіантів розробленої системи автоматизації.

Обговорення результатів

Для процесу термічної обробки ковбаси в універсальній термокамері в якості регульованих координат доцільно обрати температуру переохолодженого повітря $T_{гнв}$, температуру догрітого повітря $T_{гс}$.

До керуючих дій віднесено струм живлення термоелектричних елементів Пельтьє термоелектричного охолоджувача (I_1), струм живлення термоелектричних елементів Пельтьє термоелектричного нагрівача (I_2). Всі інші вхідні змінні, окрім керуючих дій, віднесено до неконтрольованих збурень.

Виділено дві задачі регулювання:

- Стабілізація температури переохолодження повітря $T_{гнв}$ шляхом зміни U_1 - потужності термоелектричного охолоджувача ;
- Стабілізація температури гріючого повітря $T_{гс}$ шляхом зміни U_2 - потужності термоелектричного нагрівача.

В результаті оптимального параметричного синтезу було одержано оптимальні налаштування регуляторів та проведено порівняльний аналіз якості роботи САР до та після оптимізації (табл. 1, 2).

Таблиця 1 – Результатів порівняння САР температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$ з ПІ-регулятором до і після оптимізації

САР з ПІ-регулятором	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta\theta_2^{МАКС}$	$T_{пп}, c$	
до оптимізації	2,05	10,1	22,4784
після оптимізації	1,02	9,4	20,8154

Таблиця 2 – Результати порівняння САР температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$ з ПІД-регулятором до і після оптимізації

САР з ПІД-регулятором	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta\theta_2^{МАКС}$	$T_{пп}, c$	
до оптимізації	2,1	11,6	24,2244
після оптимізації	0,4	4	13,4903

В результаті оптимального параметричного синтезу було одержано оптимальні налаштування регуляторів та проведено порівняльний аналіз якості роботи САР до та після оптимізації (табл. 3, 4).

Таблиця 3 – Результатів порівняння САР температури гарячого повітря $T_{гс}$ з ПІ-регулятором до і після оптимізації

САР з ПІ-регулятором	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta\theta_2^{МАКС}$	$T_{пп}, ^\circ C$	
до оптимізації	1,7	-	28,7923
після оптимізації	2	7,1	16,0377

Таблиця 4 – Результати порівняння САР температури гарячого повітря $T_{гс}$ з ПІД-регулятором до і після оптимізації

САР з ПІД-регулятором	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta\theta_2^{МАКС}$	$T_{пп}, c$	

до оптимізації	1	7,1	11,3022
після оптимізації	0,5	3,9	7,7142

Було проведено порівняльний аналіз перехідних процесів в параметрично оптимальних системах за значенням критерію оптимальності та показниками, для яких встановлені гранично-допустимі значення.. (таблиця 5)

Таблиця 5 – Результати порівняння варіантів САР температури переохолодженого повітря Т_{гнв}

Алгоритм регулювання	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta\theta_2^{\text{МАКС}}$	Т _{пп} , с	
ПІ	1,8	9,4	19,9
ПІД	0,48	4	13,25

Було проведено порівняльний аналіз перехідних процесів в параметрично оптимальних системах за значенням критерію оптимальності та показниками, для яких встановлені гранично-допустимі значення (таблиця 6).

Таблиця 6 – Результати порівняння варіантів САР температури догрітого повітря Т_{гс}

Алгоритм регулювання	Прямі показники якості		Критерій
	$\Delta\theta_2^{\text{МАКС}}$	Т _{пп} , °С	
ПІ	2,09	7,1	12,97
ПІД	0,05	3,9	8,69

САР температури переохолодженого повітря Т_{гнв} і з ПІ-регулятором, і з ПІД-регулятором є грубою, оскільки в умовах варіації параметрів ОК дає перехідні процеси, що сходяться. САР температури догрітого повітря Т_{гс} і з ПІ-регулятором за найнесприятливіших умов не є грубою, оскільки дає перехідні процеси що не сходяться, в усіх інших випадках САР з ПІ- і з ПІД-регулятором є грубою, оскільки в умовах варіації параметрів ОК дає перехідні процеси, що сходяться.

Проект модернізації САК є інвестиційно виправданим, тому що приріст чистого прибутку більше нуля та складає – 280945.5грн, а чистий грошовий потік за період реалізації проекту більше нуля і дорівнює 386688.3грн.

Висновки

М'ясна галузь – це одна з найважливіших та найбільших галузей у структурі харчової промисловості та для забезпечення продовольчої безпеки України.

Одним з провідних в цій галузі є сегмент виробництва ковбасних виробів.

При виробництві м'ясних та ковбасних виробів одним з основних технологічних процесів є термічна обробка продукту, яка включає варку та гаряче копчення.

Технологічний процес приготування ковбасних виробів в універсальній термокамері умовно можна поділити на два етапи: копчення та варка.

Точне дотримання технологічного регламенту приготування ковбасних виробів можливе лише за умови високоефективного управління процесом, що досягається лише шляхом автоматизації процесу.

Автоматизація процесу варки та гарячого копчення ковбас в універсальній термокамері є актуальним завданням.

Відомі рішення в цьому напрямку мають загальні недоліки, зокрема одночасно не здійснюють регулювання температури та відносної вологості в термокамері.

В одеському національному у технологічному університеті, на кафедрі автоматизації технологічних процесів та робототехнічних систем в рамках випускної роботи бакалавра запропоновано систему автоматичного управління гарячим копченням ковбас в універсальній термокамері з використанням термоелектричного теплового насосу, в якій вирішено ці питання.

В проведеному дослідженні проаналізовано технологічний процес в універсальній термокамері та складено технологічний регламент, проведено параметризацію технологічної схеми, побудовано параметричну та структурну схему.

Розроблені моделі лабораторної установки для приготування ковбаси в універсальній термокамері реалізовано в середовищі імітаційного моделювання MATLAB.

Проведена ідентифікація моделей каналів перетворення координатних дій технологічного процесу термічної обробки ковбаси

Здійснено вибір початкових наближень настроювальних параметрів ПІ та ПІД алгоритмів регулювання на основі інженерних методик параметричного (неоптимального) синтезу САР.

Проведено оптимальний синтез САР температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$ з ПІ та ПІД регулятором.

Проведено оптимальний синтез САР температури гарячого повітря $T_{гс}$ з ПІ та ПІД регулятором,

Складено регламенти функціонування та алгоритми пуску-зупинки системи нагрівання повітря в штатному та аварійному режимах, розроблена функціональна логічна схема, побудована її реалізація на ЕОМ, за допомогою середовища MATLAB.

Здійснено вибір технічних засобів отримання інформації про змінні процесу та реалізації керуючих впливів.

Технічну структуру системи управління розроблено на базі контролера ОВЕН ПЛК 160.

Проведено розробку контролерно-комп'ютерної мережі та програмування алгоритмів регулювання та логічного керування САК.

В середовищі SCADA-системи WinCCFlexible розроблено програмне забезпечення АРМ оператора-технолога процесу термічної обробки ковбасних виробів в універсальній термокамері.

Розроблено фрагменти проектної документації.

Обґрунтована економічна доцільність впровадження варіантів розробленої системи автоматизації.

Список використаних джерел кількість інтернет ресурсів $\leq 40\%$ всього списку, джерела більш ніж 10річної давності - 3

ДСТУ 8302:2015. Бібліографічні посилання.

Referenses, латинниця, офіційна транс літерація IEEE Cinanion references

1. Патент України на корисну модель №36670 «Спосіб автоматичного керування процесом копчення ковбаси у копильній камері»/ Світий І. М. Науменко А. С. МПК А23В 4/044. Заявл. 04.02.2008 № u200801320. Опубл. 10.11.2008, Бюл. №21.
2. АС СРСР №1598947 на винахід «Спосіб контролю процесу копчення харчових продуктів». МПК А23В4/04.
3. Копильня / DREVOS.- URL: <https://koptilni-drevos.com>.
4. Автоматика для копильні-термокамери/ Craft Sstore.- URL: <https://craftstore.com.ua>.
5. Патент України на корисну модель №24414 «Спосіб виробництва варено-копчених ковбас»/ Віннікова Л. Г. та ін. МПК А22С 11/00. Опубл. 25.06.2007.
6. Патент України на корисну модель №53008 «Спосіб виробництва варено-копчених ковбас»/ Асуляк А. В.. та ін. МПК А22С 11/00. Опубл. 27.09.2010.
7. Патент України на корисну модель № 69797 «Спосіб автоматичного управління процесом термічної обробки ковбасних виробів» / Трішин Ф. А., Ніколайчук С. Ю. МПК А23В 4/00. Опубл 10.05.2012.
8. АС СССР № 441910 «Спосіб управління термокамерою»/ Гробер М.С. МКИ А23В1/00. Заявл. 2.09.1972 №1828207/28- 13. Опубл. 15.12.74.
9. Системи керування термокамерами СУТЕК/ Обладнання для автоматизації ОВЕН.- URL <https://owen.ua/ua/gotovi-rishennja/systema-keruvannja-termokameramy-sutek>.

10. Петренко Д. С. «Автоматизація керування камерою варки та гарячого копчення ковбас з використанням термоелектричного теплового насосу» (рукопис).- Одеса: ОНТУ, 2022.- 200с.
11. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології» денної та заочної форми навчання.- Одеса: ОНАХТ, 2016 – 96с.
12. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології» денної та заочної форми навчання.- Одеса: ОНАХТ, 2012.- Ч1 – 112с.
13. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології» денної та заочної форми навчання.- Одеса: ОНАХТ, 2019.- Ч2 – 72с.

ДОДАТОК Б

Порядковий номер заявки, визначений заявником		Дата одержання		
(22) Дата подання заявки	Пріоритет	(51) МПК	(21) Номер заявки	
		(2022) A23B 4/044		
(86)	Реєстраційний номер та дата подання міжнародної заявки, установлені відомством-одержувачем			
(87)	Номер і дата міжнародної публікації міжнародної заявки			
ЗАЯВА про державну реєстрацію винаходу (корисної моделі)		НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ" (УКРПАТЕНТ) вул. Глазунова, 1, м. Київ-42, 01601		
Подаючи нижчезазначені документи, прошу (просимо) видати: ☐ патент України на винахід + патент України на корисну модель				
(71) Заявник(и)		Код за ЄДРПОУ		
Петренко Дмитро Сергійович				
(зазначається повне ім'я або найменування заявника(ів), його (їх) місце проживання або місцезнаходження та код держави згідно із стандартом BOIB ST.3. Дані про місце проживання винахідників-заявників наводяться за кодом (72)				
Пропшу (просимо) встановити пріоритет заявки пунктів формули винаходу за заявкою № _____ за датою:				
☐ подання попередньої заявки в державі - учасниці Паризької конвенції (навести дані за кодами (31), (32), (33)) ☐ подання до Укрпатенту попередньої заявки, з якої виділено цю заявку (навести дані за кодом (62)) ☐ подання до Укрпатенту попередньої заявки (навести дані за кодом (66))				
(31) Номер попередньої заявки	(32) Дата подання попередньої заявки	(33) Код держави подання попередньої заявки згідно із стандартом BOIB ST.3	(62) Номер та дата подання до Укрпатенту попередньої заявки, з якої виділено цю заявку	(66) Номер та дата подання до Укрпатенту попередньої заявки
(54) Назва винаходу (корисної моделі) Спосіб автоматичного керування процесом гарячого копчення продукту в універсальній термокамері				

(98) Адреса для листування Вул. Миру буд. 193, с. Трапівка, 68140, Одеська область, Україна UA																																										
Телефон +380672135350		Електронна адреса (E-mail) dmytropetrenko00@gmail.com																																								
(74) Повне ім'я та реєстраційний номер представника у справах інтелектуальної власності або повне ім'я іншої довіреної особи																																										
☐ Прошу (просимо) прискорити публікацію заявки																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Перелік документів, що додаються</th> <th style="text-align: center;">Кількість арк.</th> <th style="text-align: center;">Кількість прим.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>+ опис винаходу</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td>+ формула винаходу</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td>+ креслення та інші ілюстративні матеріали</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td>+ реферат</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> <tr> <td>+ документ про сплату збору за подання заявки</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td>☐ документ, який підтверджує наявність підстав для зменшення збору або звільнення від сплати збору</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>☐ документ про депонування штаму</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>☐ копія попередньої заявки, яка підтверджує право на пріоритет</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>☐ переклад заявки українською мовою</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>☐ документ, який підтверджує повноваження довіреної особи (довіреність)</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>☐ інші документи:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>☐ міжнародний звіт про пошук</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Перелік документів, що додаються	Кількість арк.	Кількість прим.	+ опис винаходу	4	3	+ формула винаходу	1	3	+ креслення та інші ілюстративні матеріали	1	3	+ реферат	1	3	+ документ про сплату збору за подання заявки	1	1	☐ документ, який підтверджує наявність підстав для зменшення збору або звільнення від сплати збору			☐ документ про депонування штаму			☐ копія попередньої заявки, яка підтверджує право на пріоритет			☐ переклад заявки українською мовою			☐ документ, який підтверджує повноваження довіреної особи (довіреність)			☐ інші документи:			☐ міжнародний звіт про пошук			Підстави щодо виникнення права на подання заявки й одержання патенту (без подання документів), якщо винахідник(и) не є заявником(ами): ☐ є документ про передачу прав винахідником(ами) або роботодавцем(ями) правонаступнику(ам) ☐ є документ про право спадкування		
Перелік документів, що додаються	Кількість арк.	Кількість прим.																																								
+ опис винаходу	4	3																																								
+ формула винаходу	1	3																																								
+ креслення та інші ілюстративні матеріали	1	3																																								
+ реферат	1	3																																								
+ документ про сплату збору за подання заявки	1	1																																								
☐ документ, який підтверджує наявність підстав для зменшення збору або звільнення від сплати збору																																										
☐ документ про депонування штаму																																										
☐ копія попередньої заявки, яка підтверджує право на пріоритет																																										
☐ переклад заявки українською мовою																																										
☐ документ, який підтверджує повноваження довіреної особи (довіреність)																																										
☐ інші документи:																																										
☐ міжнародний звіт про пошук																																										
(72) Винахідник(и) Винахідник(и)-заявник(и) (повне ім'я)	Місце проживання та код держави згідно із стандартом BOIV ST. 3 (для іноземних осіб - тільки код держави)		Підпис(и) винахідника(ів)- заявника(ів)																																							
Петренко Дмитро Сергійович	Вул. Миру буд. 193, с. Трапівка, 68140, Одеська область, Україна UA																																									
Я (ми) _____ (повне ім'я)																																										

прошу (просимо) не згадувати мене (нас) як винахідника(ів) при публікації відомостей стосовно заявки на видачу патенту

Підпис(и) винахідника(ів)

Підпис(и) заявника(ів)

Дата підпису

М. П.

Якщо заявником є юридична особа, то підпис особи, що має на це повноваження, із зазначенням посади скріплюється печаткою. Якщо всі винахідники виступають заявниками, то їх підписи наводяться за кодом (72).

МПК (2022) A23B 4/044

Спосіб автоматичного керування процесом гарячого копчення продукту в універсальній термокамері

Корисна модель відноситься до автоматичного керування процесом гарячого копчення продукту в універсальній термокамері і може бути використана при виробництві копчених ковбас, м'яса, риби та інших продуктів, в технологічному процесі виготовлення яких використовують копчення, а саме в м'ясопереробній, рибопереробній галузях харчової промисловості.

Відомий спосіб автоматичного керування процесом копчення ковбаси у коптільній камері, який містить контроль і регулювання температури в коптільній камері шляхом зміни подачі гріючої пари, тиску пари і води в трубопроводах шляхом зміни їх подачі, густини диму в камері шляхом зміни його подачі в камеру і програмне керування циклом гарячого і холодного копчення [Патент України на корисну модель №36670 «Спосіб автоматичного керування процесом копчення ковбаси у коптільній камері»/ Світий І. М. Науменко А. С. МПК A23B 4/044. Заявл. 04.02.2008 № u200801320. Опубл. 10.11.2008, Бюл. №21].

Недоліком даного способу є низька якість готового продукту через неврахування змін відносної вологості димоповітряної суміші в копильній камері.

Також відомий спосіб автоматичного керування процесом копчення ковбаси за допомогою водяних моделей, величину рН визначають безпосередньо під час процесу копчення під дією іоноселективних електродів, які знаходяться всередині моделі [АС СРСР №1598947 на винахід «Спосіб контролю процесу копчення харчових продуктів». МПК А23В4/04].

Недоліком даного способу є те, що він не забезпечує незалежність регульованих параметрів від впливу збурень, діючих на систему автоматичного керування в умовах реального виробництва, що призводить до значних відхилень регульованих параметрів від заданих, що приводить до зменшення продуктивності виробництва та погіршення якості готового продукту.

Також відомий спосіб автоматичного керування універсальною копильнею для холодного та гарячого копчення, який містить регулювання температури в копильній камері шляхом зміни потужності нагрівальних електричних елементів [Копильня / DREVOS.- URL: <https://koptilni-drevos.com>].

Недоліком даного способу є низька якість готового продукту через неврахування змін відносної вологості димоповітряної суміші в копильній камері.

Найбільш близьким до запропонованого, обраним за прототип є спосіб автоматичного керування процесом гарячого копчення продукту в універсальній термокамері, який містить регулювання температури в камері шляхом зміни потужності термоелектроперетворювача (ТЕП), а також регулювання відносної вологості димоповітряної суміші в камері шляхом зміни потужності ТЕП [Системи керування термокамерами СУТЕК/ Обладнання для автоматизації ОВЕН.- URL <https://owen.ua/ua/gotovi-rishennja/systema-keruvannja-termokameramy-sutek>].

Недоліком даного способу є низька якість готового продукту через низьку точність регулювання вологості, в результаті неврахування надходження в камеру зайвої вологи з деревини.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення якості готового продукту шляхом підвищення точності регулювання вологості в результаті унеможливлення потрапляння в камеру зайвої вологи з деревини.

Поставлену задачу вирішено в способі автоматичного керування процесом гарячого копчення продукту в універсальній термокамері, який містить регулювання температури в камері шляхом зміни потужності ТЕП, а також регулювання відносної вологості димоповітряної суміші в камері шляхом зміни потужності ТЕП.

Згідно корисної моделі додатково димоповітряну суміш з камери пропускають через нормалізатор вологи, який її охолоджує і забезпечує конденсацію вологи і заданий вологовміст, а потім суміш пропускають через нагрівач, забезпечуючи задану температуру.

Приклад реалізації запропонованого способу наведений на фігурі. Спосіб здійснюється таким чином.

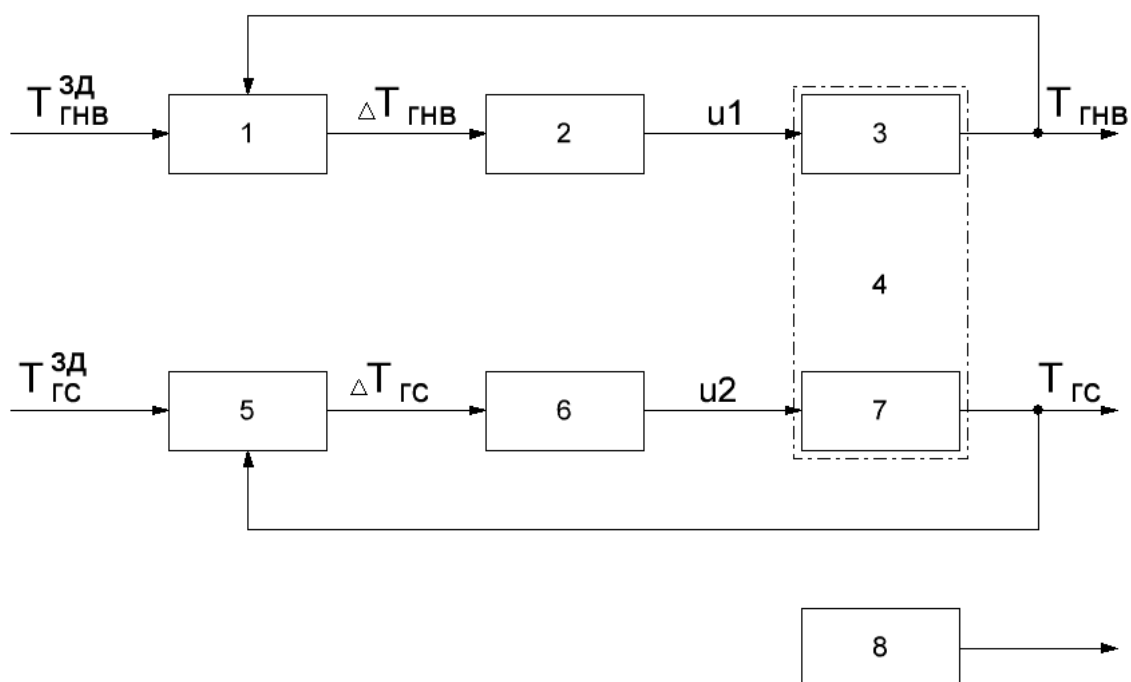
Поточне значення температури гарячого повітря з нормалізованою вологістю $T_{гнв}$ з виходу нормалізатора вологи 3 поступає на суматор 1, де порівнюється з її заданим значенням $T_{гнв}^{зд}$, і обчислюється сигнал розузгодженості $\Delta T_{гнв}$. З виходу суматора 1 сигнал розузгодженості надходить на вхід регулятора 2, який формує керуючу дію u_1 – струм живлення ТЕП. Керуюча дія з виходу регулятора 2 надходить на вхід теплообмінника (нормалізатора вологи 3) для стабілізації температури переохолодження на заданому рівні.

Поточне значення температури гарячого сухого повітря $T_{гс}$ з виходу нагрівача повітря 7 поступає на суматор 5, де порівнюється з її заданим

значенням $T_{гс}^{зд}$, і обчислюється сигнал розузгодженості $\Delta T_{гс}$. З виходу суматора 5 сигнал розузгодженості надходить на вхід регулятора 6, який формує керуючу дію u_2 – струм живлення ТЕП. Керуюча дія з виходу регулятора 6 надходить на вхід теплообмінника (нагрівача повітря 7) для стабілізації температури догрівання на заданому рівні.

Прянокопильні ароматизатори подаються в камеру з димогенератору 8.

Спосіб автоматичного керування процесом гарячого копчення продукту в універсальній термокамері



Фігура

Формула корисної моделі

Спосіб автоматичного керування процесом гарячого копчення продукту в універсальній термокамері, який містить регулювання температури в камері шляхом зміни потужності ТЕР, а також регулювання відносної вологості димоповітряної суміші в камері шляхом зміни потужності ТЕР, **який відрізняється тим, що** додатково димоповітряну суміш з камери пропускають через нормалізатор вологи, який її охолоджує і забезпечує конденсацію вологи і заданий вологовміст, а потім суміш пропускають через нагрівач, забезпечуючи задану температуру.

Реферат

Спосіб автоматичного керування процесом гарячого копчення продукту в універсальній термокамері

Корисна модель відноситься до автоматичного керування процесом гарячого копчення продукту в універсальній термокамері і може бути використана при виробництві копчених ковбас, м'яса, риби та інших продуктів, в технологічному процесі виготовлення яких використовують копчення, а саме в м'ясопереробній, рибопереробній галузях харчової промисловості.

Спосіб автоматичного керування процесом гарячого копчення продукту в універсальній термокамері містить регулювання температури в камері шляхом зміни потужності ТЕП, а також регулювання відносної вологості димоповітряної суміші в камері шляхом зміни потужності ТЕП, додатково димоповітряну суміш з камери пропускають через нормалізатор вологи, який її охолоджує і забезпечує конденсацію вологи і заданий вологовміст, а потім суміш пропускають через нагрівач, забезпечуючи задану температуру.

ДОДАТОК В

**Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет
Інститут комп'ютерної інженерії, автоматизації,
робототехніки та програмування ім.П.Н.Платонова**

**«ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ І
АВТОМАТИЗАЦІЯ – 2023»**

***МАТЕРІАЛИ
XVI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ***



19 - 20 ЖОВТНЯ 2023 р.

м.ОДЕСА

ПОТУЖНЕ ПРОГРАМОВАНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСУ

Філярський В. І., Петренко Д. С., Пашков С. О., Мазур О. В. (mazur.a.v.ua@gmail.com,
filyarsky@gmail.com, dmytropetrenko00@gmail.com, sergypashkov2001@gmail.com)

Одеський національний технологічний університет, (Україна)

В дослідженні розглянуто розробку програмованого джерела струму для керування продуктивністю термоелектричного теплового насосу потужністю 1000Вт на базі AC/DC перетворювача, DC/DC перетворювача та контролера керування. Висвітлено особливості апаратного забезпечення та цифрового керування за протоколом Modbus.

Постановка проблеми.

Останнім часом спостерігається ріст попиту на використання енергоефективних та енергозберігаючих технологій. Це зумовлює тенденцію застосування теплових насосів, в тому числі широко починають використовуватися термоелектричні теплові насоси. Особливістю таких агрегатів є необхідність живлення великим струмом при відносно малій напрузі.

Стаття присвячена розробці потужного програмованого реверсивного джерела струму для використання в системах керування термоелектричними тепловими насосами. Таке джерело струму при потужності від 1кВт повинно відповідати наступним вимогам: мати високий ККД (мінімум 90%), мінімальні масо-габаритні характеристики, цифрове дистанційне керування, складатись з стандартних комплектуючих, які є доступні в масовому виробництві.

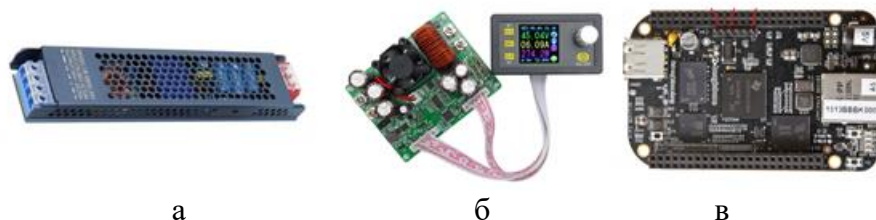
Перелік вирішених завдань. Розроблено структуру програмованого джерела струму. Розглянуто питання його апаратної й програмної реалізації з використанням одноплатного комп'ютера beaglebone black та виконавчого середовища Codesys V3.5.

Суть дослідження. Джерело живлення складається з AC/DC перетворювача (AC230V/DC48V 20A), керованого джерела струму (0-10A, 45V max), керованого мостового драйверу реверсу струму та ПЛК контролера керування. Структурна схема представлена на рисунку 1.



Рисунок 1 - Структурна схема потужного програмованого джерела струму для використання в системах керування термоелектричними тепловими насосами

На рисунку 2 зображено використані стандартні блоки з яких складається джерело живлення. Для реалізації AC/DC перетворювача використано два послідовно включених блоки живлення AC/DC CB-500W-24V(a). В якості програмованого джерела струму використано DC-DC перетворювач з цифровим керуванням DPS5020 (б), керуючий програмований логічний контролер (ПЛК) реалізовано на одноплатному комп'ютері beaglebone black (в) з виконавчою системою Codesys, керований мостовий драйвер реалізований на чотирьох польових транзисторах, керування джерелом струму здійснюється за протоколом Modbus.



а

б

в

Рисунок 2 - а - блок живлення AC/DC CB-500W-24V; б - перетворювач DC-DC DPS5020; в - одноплатний комп'ютер beaglebone black

Фрагмент програми керування перетворювачем DC-DC DPS5020 за протоколом Modbus для виконавчого середовища Codesys наведено на рисунку 3.

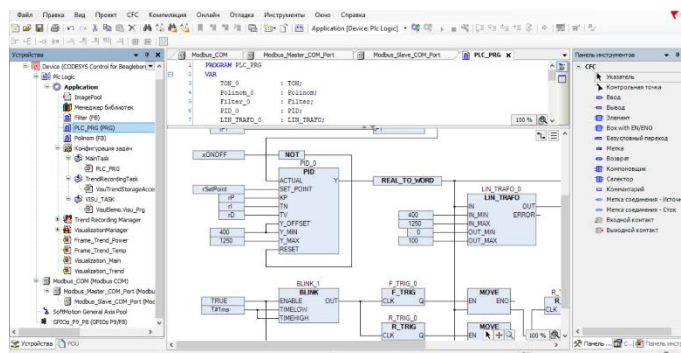


Рисунок 3 - Фрагмент програми у виконавчому середовищі CoDeSys.

В ролі Master виступає beaglebone black, в ролі Slave виступає перетворювач DC-DC DPS5020. При цьому до одного Modbus Master може бути одночасно підключено до 256 Modbus Slave. Всього beaglebone black має 6 UART портів, нумеруються вони від 0 до 5. Виконавче середовище CoDeSys сприймає їх як COM-порти з нумерацією 1 до 6 відповідно. 1-й COM-порт використовується для зовнішнього термінала, тому в проекті для роботи обираємо COM2 (UART1). Під час налаштування Modbus Slave у виконавчому середовищі CoDeSys необхідно скористатися таблицею регістрів DC-DC перетворювача (табл.1).

Таблиця 1. Таблиця регістрів DC-DC перетворювача

Функція	Опис	Кількість байтів	Десяткові знаки	Одиниця	Читати писати	Адреса регістру
U-SET	Задане значення напруги	2	2	В	R/W	0000H
I-SET	Задане значення струму	2	2	А	R/W	0001H
UOUT	Фактичне значення вихідної напруги	2	2	В	P	0002H
IOUT	Фактичне значення вихідного струму	2	2	А	P	0003H
POWER	Фактичне значення вихідної потужності	2	1 або 2	В	P	0004H
UIN	Фактичне значення вхідної напруги	2	2	В	P	0005H
LOCK	Блокування органів керування	2	0	-	R/W	0006H
PROTECT	Статус захисту	2	0	-	P	0007H
CV/CC	Стан постійної напруги / постійного струму	2	0	-	P	0008H
ONOFF	Вихідний стан перетворювача	2	0	-	R/W	0009H

Для вибору діючого COM порта в дереві проекту вибираємо підрозділ MODBUS_COM і вказуємо номер робочого порту (рис. 4).

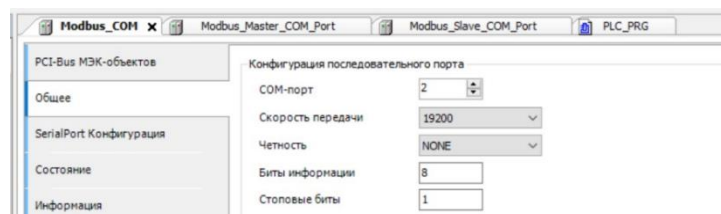


Рисунок 4 – налаштування Modbus в проекті.

Для налаштування параметрів протоколу MODBUS в дереві проекту вибираємо послідовно підрозділи MODBUS_MASTER та MODBUS_Slave та вводимо наступні параметри: протокол передачі RTU, таймаут відповіді 1000мс, проміжок часу між фреймами 10мс, адреса Modbus Slave 1, автоперезапуск з'єднання (рис. 5).

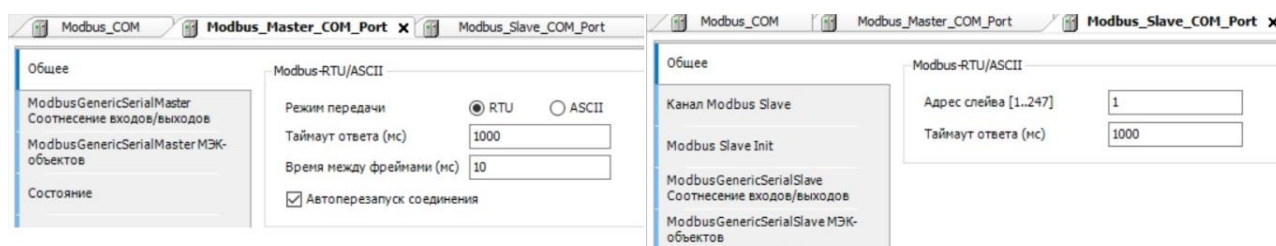


Рисунок 5 – налаштування Modbus Master та Modbus Slave у виконавчому середовищі CoDeSys.

Для налаштування каналів Modbus Slave в дереві проекту вибираємо пункт Канал Modbus slave та формуємо таблицю регістрів і команд (таблиця 1) згідно з документацією DPS5020 (рисунок 6).

Имя	Тип доступа	Триггер	Сдвиг READ	Длина	Обработка ошибок	Сдвиг WRITE	Длина	Комментарий
0 W_USET	Write Single Register (Код функции 06)	Передний фронт				16#0000	1	
1 R_UOUT	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0002	1	Сохранить посл. значение			
2 W_ISET	Write Single Register (Код функции 06)	Передний фронт				16#0001	1	
3 R_UOUT	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0003	1	Сохранить посл. значение			
4 W_ONOFF	Write Single Register (Код функции 06)	Передний фронт				16#0009	1	
5 R_ONOFF	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0009	1	Сохранить посл. значение			
6 R_POWER	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0004	1	Сохранить посл. значение			

Рисунок 6 – таблиця регістрів і команд

Для прив'язки каналів Modbus Slave до змінних проекту в дереві проекту вибираємо пункт ModbusGenericSerialSlave (рисунок 7).

Переменная	Соотнесение	Канал	Адрес	Тип	Единица	Описание
Application.PLC_PRG.WriteUSET2		W_USET2	%QX0.0	BIT		Триггерная переменная
Application.PLC_PRG.USET2		W_USET	%QW1	ARRAY [0..0] OF WORD		Write Single Register
Application.PLC_PRG.xReadUOUT2		R_UOUT	%QX4.0	BIT		Триггерная переменная
Application.PLC_PRG.UOUT2		R_UOUT	%IW0	ARRAY [0..0] OF WORD		Read Holding Registers
Application.PLC_PRG.xWriteISET2		R_UOUT[0]	%IW0	WORD		0x0002
Application.PLC_PRG.ISET2		W_ISET	%QX4.1	BIT		Триггерная переменная
		W_ISET	%QW3	ARRAY [0..0] OF WORD		Write Single Register

Рисунок 7 – співвідношення регістрів до змінних проекту

Використовуючи органи керування DC-DC перетворювача налаштовуємо Slave адрес та швидкість обміну даними.

На рисунку 8 наведено структурну схему реверсивного джерела струму для живлення шести термоелектричних перетворювачів (ТЕП) TEC1-12710 які включено в два паралельні ланцюги кожен з яких є послідовною збіркою з трьох ТЕП. Для вирівнювання різниці струмів в ланцюгах послідовно включені балансуєчі резистори.

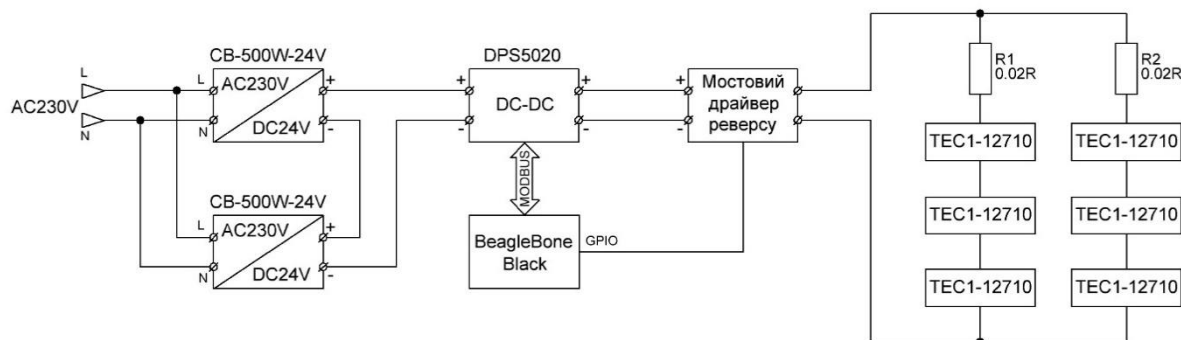


Рисунок 8 – схема електричних з'єднань.

Висновки. Розроблене програмоване джерело струму при відносно малих масо-габаритних характеристиках має максимальну потужність до 1000 Вт при струмі до 20А, зберігаючи значення ККД на високому рівні (94-96%), підтримує можливість цифрового дистанційного керування за протоколом MODBUS, складається з загально-доступних елементів вартістю до 120 USD.

Список літератури

- | | | | | | | |
|---|---|------------------|-----------------------------|------------|------|---|
| [1]. | DPS5020 | file | – | Google | Диск | - |
| https://drive.google.com/drive/folders/1Yexv_WoXYMtnnO4fUvltQDUX7falAo2N | | | | | | |
| [2]. | CODESYS Control for BeagleBone SL | | CODESYS Store International | | | - |
| https://store.codesys.com/en/codesys-control-for-beaglebone-sl.html | | | | | | |
| [3]. | Jantharamin N., Thongbuaban P. Maximum-power-point tracking using multiphase interleaved converters based on multi-unit synchronization //2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (Busan, South Korea, 26-29 Oct. 2013) – Busan, 2013. – P. 1528–1531. | | | | | |
| [4]. | Beagleboard:BeagleBoneBlack | Debian | - | eLinux.org | | - |
| https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#U-Boot_Overlays | | | | | | |
| [5]. | Setting Up the BeagleBone Black's GPIO Pins | (vadl.github.io) | | | | - |
| https://vadl.github.io/beagleboneblack/2016/07/29/setting-up-bbb-gpio | | | | | | |

КОНТРОЛЕР З ВИКОНАВЧИМ СЕРЕДОВИЩЕМ CoDeSys НА БАЗІ
ОДНОПЛАТНОГО КОМП'ЮТЕРА BEAGLEBONE BLACK

Петренко Д. С., Філярський В. І., Пашков С. О., Мазур О. В. (mazur.a.v.ua@gmail.com,
filyarsky@gmail.com, dmytropetrenko00@gmail.com, sergypashkov2001@gmail.com)

Одеський національний технологічний університет, (Україна)

В дослідженні розглянуто методику розробки контролера для використання в вбудованих системах керування з виконавчим середовищем codesys на базі одноплатного комп'ютера beaglebone black, особливості завантаження програмного забезпечення, конфігурування функцій пінів GPIO контролера. В результаті отримуємо програмований логічний контролер з вільним налаштуванням системи введення/виведення та підтримкою протоколів UART, I2C, SPI, USB2.0, mini-USB, Ethernet, HDMI, 7AI, 45DI/DO, ШІМ.

Постановка проблеми. Промислові програмовані логічні контролери ПЛК стали невід'ємною частиною сучасних систем керування. Хоча кількість та різноманіття поставлених перед ними задач тільки зростають, більшість ПЛК мають закриту та жорстку архітектуру і, у зв'язку з цим, відносно обмежений функціонал. Ціна та специфічні особливості експлуатації таких ПЛК ускладнюють їх використання для домашньої автоматизації та у навчальних цілях. Стаття присвячена розробці ПЛК, який матиме відкриту архітектуру, потужним виконавчим середовищем, підтримуватиме більшість сучасних протоколів зв'язку, матиме широкий функціонал і при цьому низьку ціну.

Перелік вирішених завдань. Розроблено ПЛК з виконавчим середовищем codesys на базі одноплатного комп'ютера beaglebone black. Розглянуто функціональні можливості одноплатного комп'ютера beaglebone black а також особливості роботи з ним. Розглянуто функціональні можливості виконавчого середовища codesys.

Суть дослідження. Для реалізації ПЛК, орієнтованого на використання у вбудованих системах керування, обрано одноплатний комп'ютер beaglebone black з операційною системою (ОС) Linux.

Живлення плати beaglebone black відбувається через USB-кабель, або зовнішнє джерело живлення 5 В постійного струму, але це рідко потрібно. Зв'язок з ПК забезпечується через USB-кабель або LAN-порт (рис. 1).



Рисунок 1 – підключення beaglebone black до ПК через USB-кабель

Тип завантажувача ОС залежить від об'єму eMMC пам'яті beaglebone black. Встановити дистрибутив Linux на eMMC плати можливо з SD-накопичувача. Запуск ОС також доступний безпосередньо і з SD-накопичувача. За перебігом встановлення ОС можна спостерігати за допомогою термінальної програми персонального комп'ютера (ПК), підключивши beaglebone black через зовнішній UART/USB конвертер до ПК. Для стабільної роботи системи встановлювати найсучаснішу версію Debian.

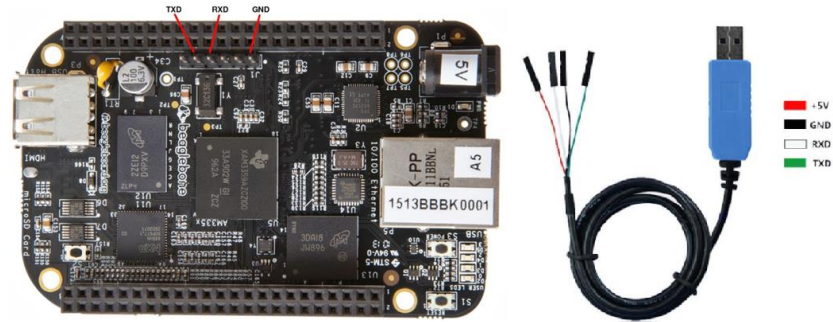


Рисунок 2 - beaglebone black зовнішній UART/USB конвертер

Після вдалої інсталяції ОС Linux, на beaglebone black встановлюємо виконавчу систему codesys (рис 2).

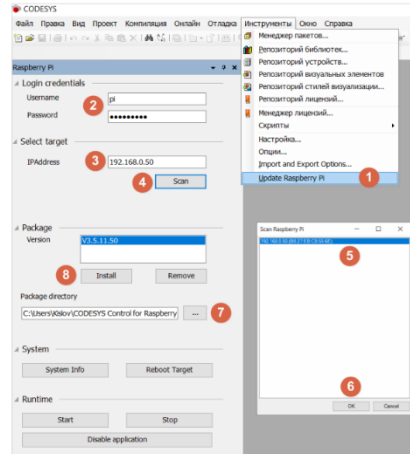


Рисунок 2 – Встановлення виконавчої системи codesys на beaglebone black

Особливістю beaglebone black є те, що більшість контактів GPIO плати може мати декілька призначень (рис 3), які ми конфігуруємо в залежності від поставленої задачі.

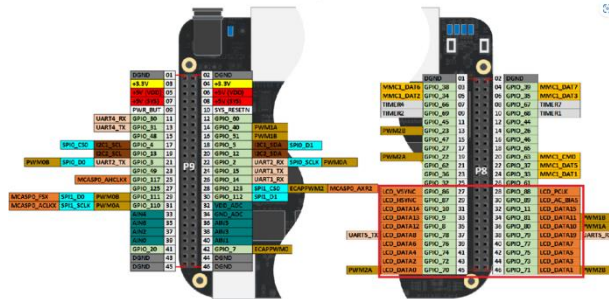


Рисунок 3 – Призначення контактів beaglebone black

Налаштування функцій пінів плати здійснюється шляхом редагування конфігураційних файлів beaglebone black через Putty - термінальну програму ПК(рис 5).

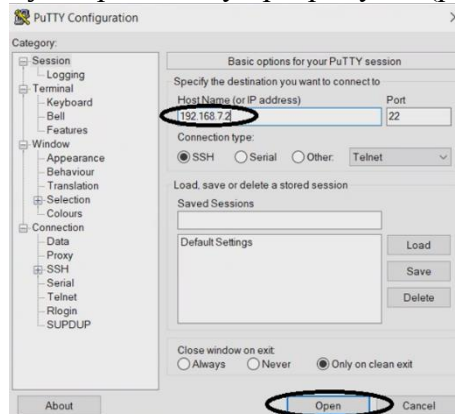


Рисунок 5 – вікно термінальної програми

```
login as: debian
Pre-authentication banner message from server:
| Debian GNU/Linux 10
|
| BeagleBoard.org Debian Buster Console Image 2023-05-03
| Support: https://bbb.io/debian
| default username:password is [debian:temppwd]
|
End of banner message from server
debian@192.168.7.2's password:

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Thu Jul 6 13:38:07 2023 from 192.168.7.1
debian@beaglebone:~$ sudo nano /boot/uEnv.txt
[sudo] password for debian:
debian@beaglebone:~$
```

Рисунок 6 - вікно терміналу beaglebone black

У вікні терміналу beaglebone black авторизуємося (за замовчуванням логін : debian, пароль: temppwd). Для доступу до редагування конфігураційного файлу виконуємо команду `sudo nano /boot/uEnv.txt` (рис 6). Після завершення зберігаємо відредагований конфігураційний файл для подальшого використання.

Наприклад, для того щоб звільнити під DI/DO піни GPIO зконфігуровані для роботи з HDMI необхідно:

- розкоментувати (видалити решітки “#”) два рядки: `disable_uboot_overlay_video=1`
`disable_uboot_overlay_audio=1`;
- виконати команду Write Out, затиснувши клавіші Ctrl+O;
- виконати команду «перезаписати» затиснувши клавіші Ctrl+(M+A);
- затиснути клавіші Ctrl+X для виходу.

Для активувації UART, необхідно знайти в конфігураційному файлі рядок `#uboot_overlay_addr4=<file4>.dtbo`, та замінити його на `uboot_overlay_addr4=/lib/firmware/BB-UART1-00A0.dtbo`.

Висновки. Таким чином на базі доступного апаратного та програмного забезпечення (beaglebone black + codesys v3.5) ми отримали ПЛК з відкритою архітектурою та підтримкою інтерфейсів UART, I2C, SPI, USB2.0, mini-USB, Ethernet, HDMI, 7AI, 45DI/DO, PWM.

Список літератури

- [1]. [CODESYS Control for BeagleBone SL | CODESYS Store International](https://store.codesys.com/en/codesys-control-for-beaglebone-sl.html) - <https://store.codesys.com/en/codesys-control-for-beaglebone-sl.html>
- [2]. [Терморегулятори BeagleBone Black, конфігурація штифтів, особливості та застосування \(microcontrollerslab.com\)](https://microcontrollerslab.com/beaglebone-black-pinout-pin-configuration-features-applications/) - <https://microcontrollerslab.com/beaglebone-black-pinout-pin-configuration-features-applications/>
- [3]. [PowerPoint-Präsentation \(codesys.com\)](https://www.codesys.com/fileadmin/data/Images/Download/CODESYS-Features-Improvements-lv.pdf) - <https://www.codesys.com/fileadmin/data/Images/Download/CODESYS-Features-Improvements-lv.pdf>
- [4]. [BeagleBone Black — BeagleBoard Documentation](https://docs.beagleboard.org/latest/boards/beaglebone/black/index.html) - <https://docs.beagleboard.org/latest/boards/beaglebone/black/index.html>
- [5]. [Beagleboard:BeagleBoneBlack Debian - eLinux.org](https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#U-Boot_Overlays) - https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#U-Boot_Overlays
- [6]. [Setting Up the BeagleBone Black's GPIO Pins \(vadl.github.io\)](https://vadl.github.io/beagleboneblack/2016/07/29/setting-up-bbb-gpio) - <https://vadl.github.io/beagleboneblack/2016/07/29/setting-up-bbb-gpio>

МОДЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В
СЕРЕДОВИЩІ MATLAB Simulink ДЛЯ КОНТРОЛЕРІВ З ВИКОНАВЧОЮ СИСТЕМОЮ
CoDeSys V3.5Пашков С. О., Філярський В. І., Петренко Д. С. (sergypashkov2001@gmail.com,
filyarsky@gmail.com, dmytropetrenko00@gmail.com)

Одеський національний технологічний університет, (Україна)

В дослідженні розглянута методика використання середовища Matlab Simulink для модельно-орієнтованого проектування програмного забезпечення програмованих логічних контролерів (ПЛК) з виконавчою системою CoDeSys V3.5.

Постановка проблем. Після розробки та тестування алгоритмів безперервного та логіко-програмного керування, спеціалістами з систем керування, під час програмування ПЛК спеціалістами-програмістами подекуди виникають різноманітні проблеми пов'язані з «людським» фактором, які призводять до неточної реалізації алгоритму в програмному коді. Одним з шляхів запобігання цих помилок є використання модельно-орієнтованого проектування програмного забезпечення, що дозволяє розробляти та проводити імітаційне моделювання як усієї системи цілком, так і її компонентів. А автоматична генерація програмного коду зменшує вірогідність появи більшості помилок пов'язаних із людським фактором та дозволяє суттєво скоротити час розробки та верифікації прикладного програмного забезпечення. Одним з інструментів модельно-орієнтованого проектування є пакет прикладних програм MATLAB та його додаток для візуального програмування при моделюванні динамічних систем SIMULINK. Додаток Simulink PLC Coder дозволяє конвертувати отриманий алгоритм або його частини у програмний код для подальшого використання в різноманітних ПЛК. У статті розглянуто процес конвертації частини алгоритму у програмний код та його імпорт у виконавче середовище CoDeSys V3.5.

Перелік вирішених завдань. У дослідженні розглянуті питання використання модельно-орієнтованого проектування при розробці алгоритмів керування на прикладі реалізації фільтра низьких частот у середовищі Matlab Simulink, генерації програмного коду згідно стандарту IEC 61131-3 та його імпорт у середовище CoDeSys V3.5.

Суть дослідження. Додаток Simulink PLC Coder доступний на версіях Matlab 2012a та новіших, тому розробка фільтру проводилась у версії Matlab 2022b. До прикладу розглянемо задачу реалізації фільтру низьких частот другого порядку з передатною функцією $\frac{10p+1}{(2p+1)^2}$ та часом квантування $T_k = 0.1$ с. Переведемо задану передатну функцію з неперервного часу у дискретний і в результаті отримуємо наступне рівняння $\frac{101-100z^{-1}}{441-840z^{-1}+400z^{-2}}$. У найпростішому випадку для реалізації передатної функції фільтра скористаємося елементом Discrete Filter з бібліотеки plcLib для чого у командному рядку Matlab необхідно прописати команду «plcLib». Копіюємо обраний блок у поле Simulink, записуємо у ньому z-передатну функцію та встановлюємо час квантування Sample Time = 0.1. Налаштування Discrete Filter наведені на рисунку 1.

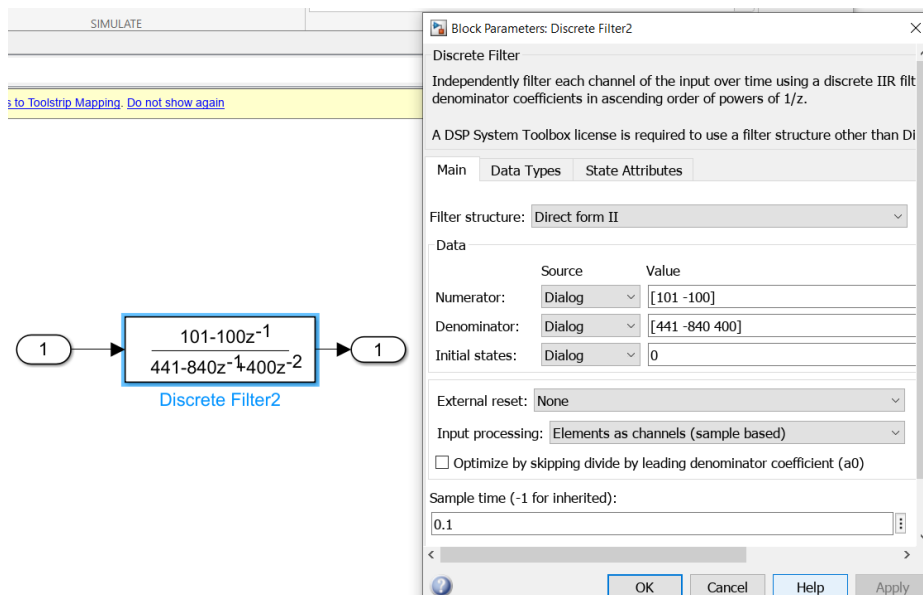


Рисунок 1 – Реалізація фільтра низьких частот у цифровій формі в середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink

Далі отриманий алгоритм об'єднуємо у підсистему яку далі розглядаємо як окрему частину. Для цього виділяємо фільтр, натискаємо праву кнопку миші, обираємо «Create subsystem for selection», переходимо у параметри підсистеми та ставимо галочку навпроти «Treat as atomic unit». На рисунку 2 наведено налаштування підсистеми з фільтром.

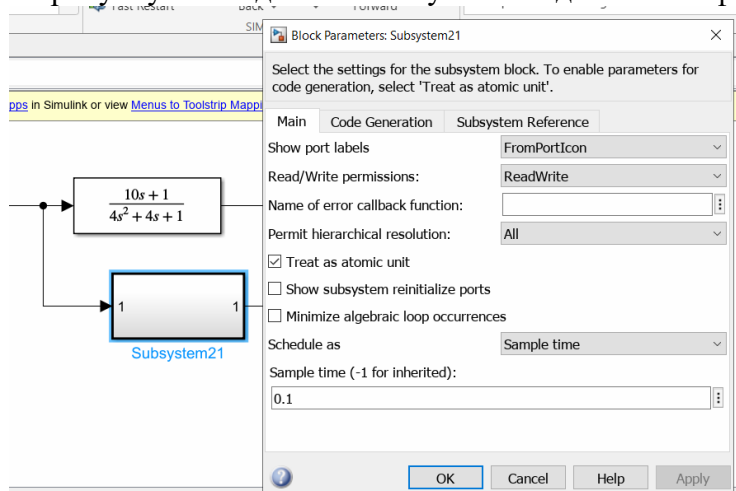


Рисунок 2 – Налаштування підсистеми алгоритму

Перед генерацією програмного коду необхідно обрати цільове інтегроване середовище розробки. Для цього натискаємо правою кнопкою миші по підсистемі та переходимо у «PLC Code => Options...», де у рядку «Target IDE» обираємо, в нашому випадку, «3S CoDeSys 3.5». Щоб згенерувати код натискаємо правою кнопкою миші по підсистемі => «PLC Code => Generate Code for Subsystem». Після чого автоматично створюються файл ST та XML Document що мають таку ж назву як і файл Simulink.

Для імпорту файлів та оновлення компонентів з Simulink PLC Coder необхідно встановити плагін CODESYS «Simulink PLC Coder Import». Далі відкриваємо проект CODESYS, переходимо в меню «Проект => Simulink PLC Coder Import...» та обираємо «Add and import PLC Coder files...» після чого відкриваємо згенерований XML Document. Для використання згенерованої частини програмного коду необхідно додати блок «Елемент» та підписати його назвою підсистеми в Simulink. На рисунку 3 показаний функціональний блок фільтра у виконавчому середовищі CoDeSys V3.5.

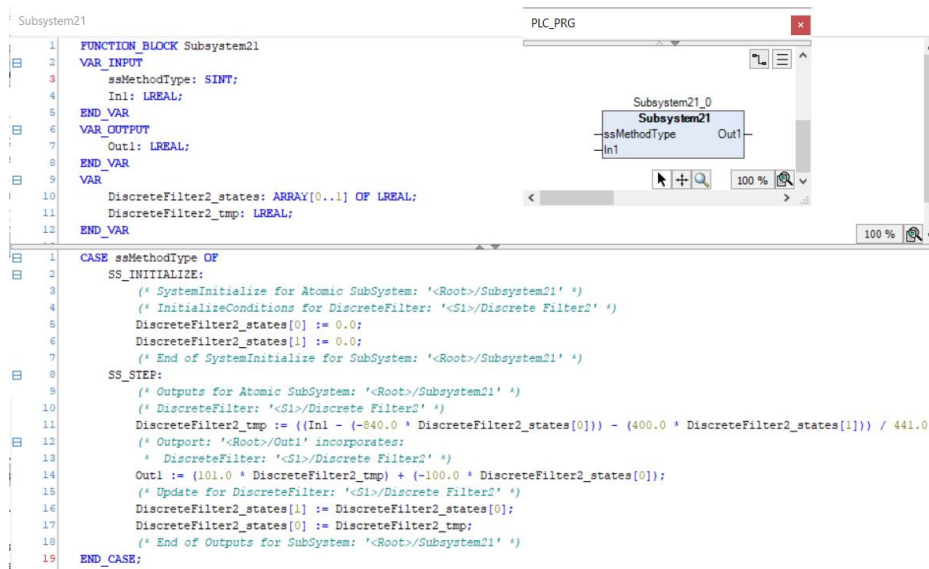


Рисунок 3 – Згенерований програмний код фільтру у вигляді функціонального блоку у виконавчому середовищі CoDeSys V3.5.

Висновок. Simulink PLC Coder надає можливість генерувати апаратно-незалежні структуровані текстові та сходові діаграми IEC 61131-3 із моделей Simulinkmodels, діаграм стану та функцій MATLAB. Структурований текст генерується в PLCopen XML та інших форматах файлів, які підтримуються більшістю інтегрованими середовищами розробки (IDE), включаючи програмні рішення 3S-Smart CODESYS, Rockwell Automation Studio 5000, Siemens TIA Portal і Omron Sysmac Studio. Ви можете скопіювати та розгорнути отриману програму на численних програмованих логічних контролерах та програмованих контролерах автоматизації. Інструмент «Simulink PLC Coder Import» дозволяє імпортувати файли Simulink PLC Coder і оновлювати імпортовані компоненти. Всі імпортовані компоненти можуть оновлюватися автоматично з підтвердженням або без нього. Поведінку оновлення можна встановити для кожного імпортованого файлу.

Список використаної літератури

- [1]. Модельно-орієнтоване проектування програмного забезпечення для вбудовуваних систем в середовищі Matlab/Simulink. Топораш Г.К., Мазур А.В, Ковальчук Д. А., Пушкін А.А. Одеська Національна Академія Харчових Технологій, м. Одеса, 2014. Available: https://www.researchgate.net/publication/307758793_Modelno-orientirovannoe_proektirovanie_programmnogo_obespecenia_dla_vstraivaemyh_sistem_v_srede_MatlabSimulink.
- [2]. [Кодер ПЛК Simulink - MATLAB \(mathworks.com\) https://www.mathworks.com/products/simulink-plc-coder.html](https://www.mathworks.com/products/simulink-plc-coder.html)
- [3]. [PowerPoint-Präsentation \(codesys.com\) https://www.codesys.com/fileadmin/data/Images/Download/CODESYS-Features-Improvements-lv.pdf](https://www.codesys.com/fileadmin/data/Images/Download/CODESYS-Features-Improvements-lv.pdf)
- [4]. [Simulink PLC Coder\(TM\) Import \(codesys.com\) https://us.store.codesys.com/simulink-plc-coder-import.html](https://us.store.codesys.com/simulink-plc-coder-import.html)
- [5]. [Simulink PLC Coder Import — Product Data Sheet V0.0.0.1 \(codesys.com\) https://us.store.codesys.com/media/n98_media_assets/files/000062-F/2/Simulink%20PLC%20Coder%20Import_en.pdf](https://us.store.codesys.com/media/n98_media_assets/files/000062-F/2/Simulink%20PLC%20Coder%20Import_en.pdf)
- [6]. [Генерація коду - MATLAB і Simulink \(mathworks.com\) https://www.mathworks.com/help/overview/code-generation.html?s_tid=hc_product_group_bc](https://www.mathworks.com/help/overview/code-generation.html?s_tid=hc_product_group_bc)
- [7]. [Кодер ПЛК Simulink Документації \(mathworks.com\) https://www.mathworks.com/help/plccoder/index.html?s_tid=hc_product_card](https://www.mathworks.com/help/plccoder/index.html?s_tid=hc_product_card)

[8]. [Обмеження на генерацію структурованого текстового коду - MATLAB і Simulink \(mathworks.com\)](https://www.mathworks.com/help/plccoder/ug/structured-text-code-generation-limitations.html) <https://www.mathworks.com/help/plccoder/ug/structured-text-code-generation-limitations.html>

ДОДАТОК Г

Петренко Д. С.

Магістрант кафедри АТПіРС ОНТУ

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-7739-5755>

dmytropetrenko00@gmail.com

Мазур О. В.

Доцент кафедри АТПіРС ОНТУ; к.т.н.

Одеський національний технологічний університет

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0001-7104-9010>

mazur.a.v.ua@gmail.com

Пашков. С. О.

Магістрант кафедри АТПіРС ОНТУ

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-0202-7015>

sergypashkov2001@gmail.com

Ковальчук Д.А.

ст. викладач ОНТУ, к.т.н.

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-0549-5244>

radiolomaster@gmail.com

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО РЕКУПЕРАТОРА ТЕПЛА "ПОВІТРЯ - ПОВІТРЯ" ЯК ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

Анотація. Доповідь присвячена розробці імітаційної математичної моделі термоелектричного рекуператора тепла "повітря - повітря" як об'єкту керування, що включає в себе три основні складові: модель термоелектричного перетворювача, модель теплопередачі через плоску стінку та модель конвективного теплообміну. Імітаційна модель реалізована в середовищі Matlab Simulink.

Ключові слова: термоелектричний перетворювач, теплопередача, конвективний теплообмін, математична модель.

1.ВСТУП. Використання термоелектричних перетворювачів (ТЕП) для рекуперації теплової енергії паро-повітряних сумішей при реалізації технологічних процесів харчових технологій дозволяє суттєво зменшити енергетичні витрати і знизити собівартість готової продукції. Енергетична ефективність ТЕП при реалізації таких процесів в значній мірі залежить від здатності системи керування підтримувати енергоефективні режими рекуперації. Розробка ефективних систем автоматичного керування (САК) неможлива без наявності імітаційної аналітичної математичної моделі такого процесу як об'єкту керування (ОК).

2.ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Математична модель термоелектричного рекуператора тепла «повітря – повітря» як ОК включає в себе три основні складові: модель ТЕП, модель теплопередачі через «плоску стінку» та модель конвективного теплообміну «стінка-повітря»

2.1. Для розрахунку конвективного теплового потоку Q_k скористаємося наступною залежністю

$$Q_k = F \cdot a \cdot (t_{ст} - \frac{t_{пвх} + t_{пвих}}{2}) \quad (1)$$

Де: F – площа поверхні плоскої стінки, a – коефіцієнт теплопередачі Вт/(м²·К) в залежності від швидкості руху середовища відносно стінки, $t_{ст}$ – температура стінки, $t_{пвх}$, $t_{пвих}$ – температура повітря на вході та виході рекуператора відповідно.

$$Q_{CT} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot F \cdot (t_{CT1} - t_{CT2}) \quad (2)$$
$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t \quad (3)$$

2.3. Тепловий баланс з «холодного» боку ТЕП

$$Q_X = Q_{XCT} - Q_{HXCT} = Q_{XK} \quad (4)$$

$$Q_{\text{хст}} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot F_{\text{хст}} \cdot \Delta T_{\text{хст}} \quad (5)$$

$$Q_{\text{ХК}} = F_{\text{Х}} \cdot \alpha_{\text{Х}} \cdot \left(t_{\text{ХСТ}} - \frac{(t_{\text{ХПВХ}} + t_{\text{ХПВИХ}})}{2} \right) \quad (6)$$

$$Q_{HXCT} = c_{XCT} \cdot m_{XCT} \cdot (t_{XCT1} - t_{XCT2})$$

$$Q_{\Gamma} = Q_X + P = Q_{\Gamma CT} - Q_{HT CT} = Q_{\Gamma K} \quad (8)$$

$$Q_{\text{rct}} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot F_{\text{rct}} \cdot \Delta T_{\text{rct}} \quad (9)$$

$$Q_{ГК} = F_{Г} \cdot \alpha_{Г} \cdot \left(t_{ГСТ} - \frac{(t_{ГПВХ} + t_{ГПВИХ})}{2} \right) \quad (10)$$

$$Q_{\text{HГСТ}} = c_{\text{ГСТ}} \cdot m_{\text{ГСТ}} \cdot (t_{\text{ГСТ1}} - t_{\text{ГСТ2}})$$

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

```

graph LR
    I((I)) --> ModelTEP[Модель ТЕП]
    ModelTEP -- Qg --> ModelHotWall[Модель теплопередачи через горячую стенку]
    ModelTEP -- Qx --> ModelColdWall[Модель теплопередачи через холодную стенку]
    ModelHotWall -- Tгп --> ModelHotConv[Модель конвективного теплообмена]
    ModelColdWall -- Tхп --> ModelColdConv[Модель конвективного теплообмена]
    ModelHotWall -- Tалг --> ModelHotConv
    ModelColdWall -- Tалх --> ModelColdConv
    ModelHotConv -- Tгп --> ModelHotWall
    ModelColdConv -- Tхп --> ModelColdWall
    ModelHotConv -- Tвихлг --> OutHot[Tвихлг]
    ModelColdConv -- Tвихлх --> OutCold[Tвихлх]
  
```

На рисунку прийняті наступні позначення: I – струм живлення ТЕП, Q_g – тепловий потік від гарячої сторони ТЕП, Q_x – тепловий потік від холодної сторони ТЕП, $T_{гп}$ – температура

гарячої сторони ТЕП, $T_{хп}$ – температура холодної сторони ТЕП, $Sp_{г}$ та $Sp_{х}$ – швидкість руку потоку повітря, $T_{алг}$ та $T_{алх}$ – температура поверхні радіатора з гарячої та холодної сторони відповідно.

3.1. Математична модель термоелектричного перетворювача (ТЕП). Величини «холодного» Q_x та «гарячого» теплового потоку Q_r ТЕП описуються рівняннями (12) та (13) відповідно.

Величина «холодного» теплового потоку може бути описана з рівняння

$$Q_x = -\frac{\Delta T}{\theta_m} + \alpha_m \cdot T_a \cdot I - \frac{I^2 R_m}{2} \quad (12)$$

Величина «гарячого» теплового потоку дорівнює є сумі ефекту Пельтьє ($\alpha_m T_l$), теплопровідності елемента (t / θ_m) і теплового ефекту Джоуля ($I^2 R_m$). Дію ефекту Томсона не описуємо оскільки вона не значна. Описується залежністю.

$$Q_r = -\frac{\Delta T}{\theta_m} + \alpha_m \cdot T_a \cdot I + \frac{I^2 R_m}{2} \quad (13)$$

Параметри α_m , θ_m і R_m можуть бути розраховані з листа даних виробників відповідно до рівнянь (14-15).

$$R_m = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} \cdot \frac{(T_e - \Delta T_{\max})}{T_e} \quad (13)$$

$$\theta_m = \frac{\Delta T_{\max}}{I_{\max} \cdot V_{\max}} \cdot \frac{2 \cdot T_e}{(T_e - \Delta T_{\max})} \quad (14)$$

$$\alpha_m = \frac{V_{\max}}{T_e} \quad (15)$$

Де: $I_{\max}$ – максимально допустимий струм, $V_{\max}$ – напруга яка виникає на термоелементі при $I_{\max}$, $\Delta T_{\max}$ – максимально допустима різниця температур між холодною та гарячою стороною, Q_x – холодний тепловий потік, Q_r – гарячий тепловий потік, R_m – електричний опір термоелемента [Ом], θ_m – тепловий опір елемента [K/W], α_m – коефіцієнт р–п переходу Зеебека [V/K], T_e – абсолютна температура теплої сторони [K], T_a – абсолютна температура холодної сторони [K].

3.2. Математична модель теплопередачі через плоску стінку. Математичні моделі температури поверхні радіатора з гарячої сторони $t_{ст1}$ (15) та поверхні радіатора з холодної сторони (16) мають вигляд:

$$T_{алг} = \left(\int \frac{Q_{rn} - (T_{ал1} - T_{пвх}) \cdot F_{ал} \cdot a}{m_{ал} \cdot c_{ал}} + T_{0_{вх}} \right) \quad (15)$$

$$T_{алх} = \left(\int \frac{(T_{пвх} - T_{ал1}) \cdot F_{ал} \cdot a - Q_{xn}}{m_{ал} \cdot c_{ал}} + T_{0_{вх}} \right) \quad (16)$$

Математичні моделі температури гарячої (17) та холодної (18) сторін ТЕП мають вигляд

$$T_{гп} = \int \frac{Q_{rn} - (T_{ал} - T_{пвх}) \cdot F_{ал} \cdot a}{M_{ал} \cdot c_{ал}} + \frac{Q_{rn} \cdot F_{ал} \cdot R_{ал}}{h_{ал}} \quad (17)$$

$$T_{хп} = \int \frac{Q_{xn} - (T_{ал} - T_{пвх}) \cdot F_{ал} \cdot a}{M_{ал} \cdot c_{ал}} - \frac{Q_{xn} \cdot F_{ал} \cdot R_{ал}}{h_{ал}} \quad (18)$$

3.3. Математична модель конвективного теплообміну. Математичні моделі температури повітря на виході з гарячої (19) та холодної (20) сторони рекуператора мають вигляд

$$T_{п_вих_г} = \frac{(T_{алг} - T_{возд_вх}) * F_{ал} * a}{m_{возд} * c_{возд}} + T_{возд_вх} \quad (19)$$

$$T_{п_вих_х} = \frac{(T_{алх} + T_{возд_вх}) * F_{ал} * a}{m_{возд} * c_{возд}} - T_{возд_вх} \quad (20)$$

Де: $T_{гп}$ – температура робочої сторони ТЕП, $T_{алг}, T_{алх}$ – температура(гарячої та холодної) поверхонь радіаторів, $Q_{гп}, Q_{хп}$ – гарячий та холодний тепловий потік від ТЕП, $F_{ал}$ – площа поверхні радіатора, $R_{ал}$ – тепловий опір радіатора, $h_{ал}$ – товщина радіатора, $T_{возд_вх}$ – температура вхідного повітря, a – коефіцієнт тепловіддачі, $c_{ал}$ – теплоємність алюмінію, $m_{возд}$ – масові витрати повітря, $c_{возд}$ – теплоємність повітря, $T_{(0_вх)}$ – початкова температура радіатора, $T_{(ал.1)}$ – температура радіатора на крок раніше, $m_{ал}$ – маса радіатора, $c_{ал}$ – теплоємність радіатора.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Модель була застосована як складова частина загальної комірчастої моделі рекуперації тепла «повітря-повітря» технологічного процесу гарячого копчення ковбаси як ОК. На рисунку 2 представлені квазістатичні залежності температури гарячого (а) та холодного(б) повітря у рекуператорі від струму живлення ТЕП.

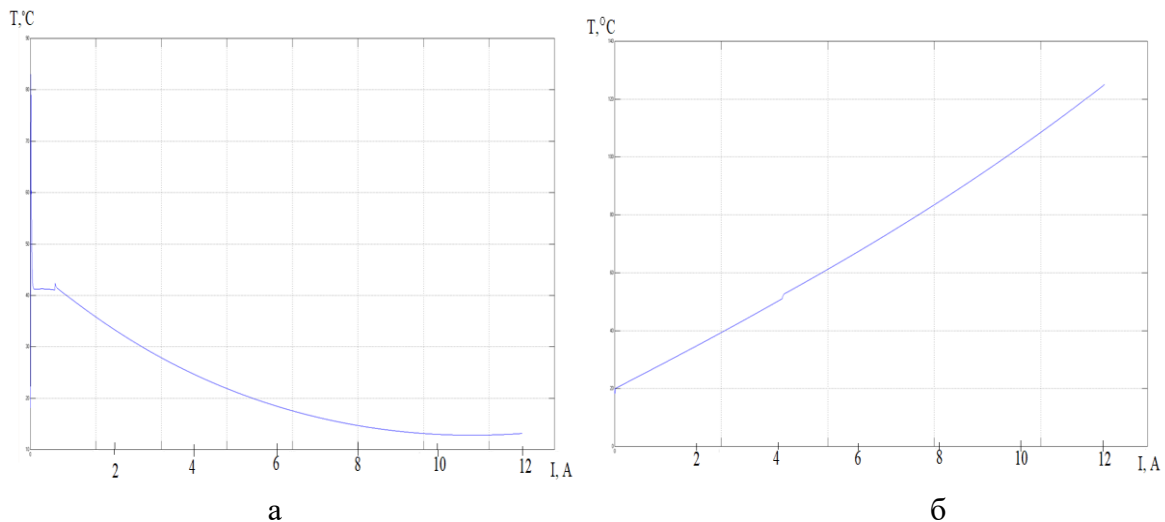


РИС.2- квазістатичні залежності температури гарячого (а) та холодного(б) повітря у рекуператорі від струму живлення ТЕП.

У зв'язку з обмеженістю об'єму доповіді інші складові загальної моделі будуть розглянуті в наступних доповідях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] БОЙКО, Валентин Семенович, et al. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: підручник, книга 3.
- [2] DISALVO, Francis J. Thermoelectric cooling and power generation. Science, 1999, 285.5428: 703-706.

ДОДАТОК І

УДК 681.5.01 : 637.524 : 621.577

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГАРЯЧОГО КОПЧЕННЯ КОВБАС В ТЕРМОКАМЕРІ З ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ РЕКУПЕРАТОРОМ ТЕПЛА

Д. С. Петренко, магістрант кафедри автоматизації технологічних процесів
і робототехнічних систем

С. О. Пашков, магістрант кафедри автоматизації технологічних процесів і
робототехнічних систем

О. В. Мазур, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації
технологічних процесів і робототехнічних систем

Д. А. Ковальчук, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри
автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем

Одеський Національний Технологічний Університет

E-mail: mazur.a.v.ua@gmail.com

***Анотація.** Робота присвячена розробці системи автоматичного керування гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла. Розроблено параметризовану технологічну схему процесу як об'єкту керування, виділено основні параметри, що підлягають регулюванню та їх технологічні регламенти – температура переохолодження повітря $T_{гнв}$ та температура гарячого повітря $T_{гс}$ - та відповідні керуючі дії: струм живлення термоелектричного охолоджувача та струм живлення термоелектричного нагрівача. Розроблено структурну схему технологічного процесу гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла. Методом імітаційного моделювання отримано динамічні властивості основних каналів перетворень об'єкта. Зі знятих перехідних характеристик визначили передатні функції каналів регулювання. Проведено параметричний та оптимальний синтез САК температури переохолодження повітря $T_{гнв}$ та температури гарячого повітря $T_{гс}$. Отримані САК були перевірені на грубість*

при дії параметричних збурень.

Ключові слова: *термоелектричний перетворювач, рекуперація тепла, система автоматичного керування, гаряче копчення.*

Актуальність. Одним з основних технологічних процесів при виробництві ковбасних виробів є термічна обробка продукту, яка включає варку та гаряче копчення. Термічна обробка є досить енерговитратним процесом. Одним зі шляхів зниження енергетичних витрат у технологічних процесах термічної обробки ковбасних виробів є використання термоелектричних теплових насосів, за допомогою яких може бути реалізовано процес глибокої рекуперації тепла вхідних та вихідних пароповітряних сумішей, що формуються в процесі теплової обробки. Застосування режимів рекуперації тепла пароповітряних сумішей призводить до збільшення кількості перехресних взаємозв'язків, що, безумовно, ускладнює умови функціонування систем керування такими процесами. Тому дослідження таких систем керування є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Використання теплових насосів (ТН) для глибокої рекуперації тепла пароповітряних сумішей є одним з найбільш перспективних шляхів підвищення енергетичної ефективності при реалізації теплових та тепло-масообмінних процесів[1, 2, 3, 4]. Організація замкненого циклу руху повітря з рекуперацією теплової енергії та нормалізації вологості повітря дозволяє суттєво знизити енергетичні втрати та таким чином підвищити енергетичну ефективність процесів варення та гарячого копчення ковбас. Використання термоелектричних ТН для рекуперації тепла пароповітряних сумішей при реалізації процесів варення та гарячого копчення ковбас має ряд переваг перед використанням парокомпресійних ТН. Перш за все, це можливість ефективної рекуперації тепла високотемпературних пароповітряних сумішей[3]. Суттєвою перевагою використання термоелектричних ТН також є відсутність рухомих частин, холодоагентів, вібрацій та безшумність роботи[5]. Довгостроковість і надійність роботи та малі габарити та вага[4]. Збільшення інтересу до використання термоелектричних ТН при реалізації систем рекуперації тепла зумовлене розвитком силової

електроніки, що дозволяє будувати керовані джерела живлення невеликої вартості та з ККД до 96%.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка двомірної системи автоматичного керування процесом гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла, яка забезпечує утримання в регламентних зонах значень температури та вологості гріючої пароповітряної суміші у всіх сталих та перехідних режимах.

Матеріали і методи дослідження. Основним методом дослідження є системний аналіз. Для ідентифікації моделей об'єкту було використано інженерні методики ідентифікації моделей об'єкту керування та метод імітаційного моделювання [6]. При синтезі системи автоматичного керування(САК) використано методи параметричного та оптимального синтезу [7]. Основним експериментальним методом обрано імітаційне моделювання в середовищі Matlab Simulink.

Результати дослідження та їх обговорення. Параметризована схема технологічного процесу гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла представлена на рисунку 1.

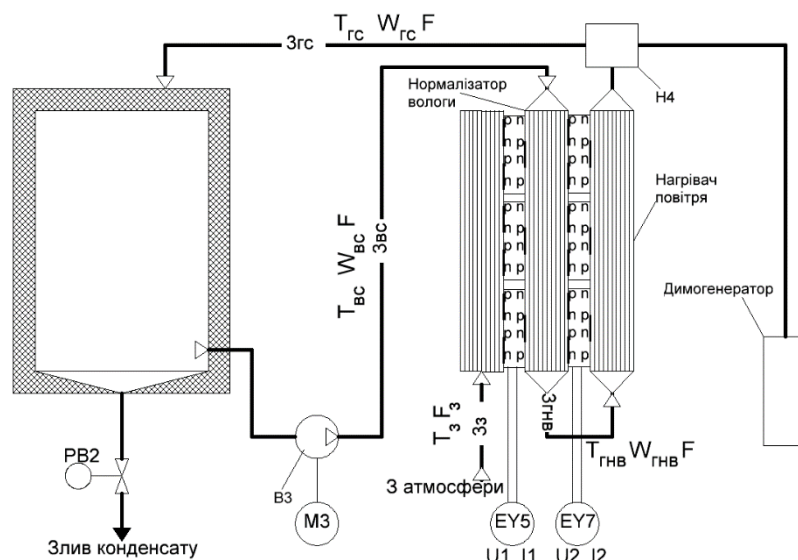


Рис. 1 – Параметризована схема технологічного процесу гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла.

На параметризованій схемі процесу гарячого копчення прийняті наступні позначення: $T_{ГС}$ – температура гарячого повітря, $W_{ГС}$ – вологість гарячого

повітря, F – витрати повітря, T_{BC} – температура відпрацьованого повітря, W_{BC} – вологість відпрацьованого повітря, $T_{ГНВ}$ – температура переохолодженого повітря, $W_{ГНВ}$ – вологість переохолодженого повітря, T_3 – температура атмосферного повітря, F_3 – витрати атмосферного повітря, u_1 – струм живлення термоелектричного охолоджувача, u_2 – струм живлення термоелектричного нагрівача, ВЗ – циркуляційний вентилятор, Н4 – ежектор.

Процес гарячого копчення ковбаси полягає в термічній обробці ковбасних напівфабрикатів (батони ковбаси) теплоносієм у вигляді пароповітряної суміші з температурою, що змінюється в процесі копчення від 60°C до 95°C та відносною вологістю $W=5\%$. При досягненні в центрі ковбасного батону температури 75°C термічна обробка(копчення) вважається завершеною.

Розробка концептуальної моделі об'єкта регулювання

Виділимо дві задачі регулювання:

- Стабілізація температури переохолодження повітря $T_{гнв}$ на виході з нормалізатора вологи зміною струму живлення U_1 термоелектричного охолоджувача;
- Стабілізація температури гарячого повітря $T_{гс}$ зміною струму живлення U_2 термоелектричного нагрівача;

1.Таблиця регламентів

Назва параметрів	Позначення	Одиниці вимірювання	Номінальне значення параметру	Припустимі відхилення від номіналу		
				Тривалі	Короткочасні	
				Величина	Величина	Час, сек
1	2	3	4	5	6	7
Температура переохолодженого повітря	$T_{гнв}$	$^{\circ}\text{C}$	20	± 0.5	± 1	60

Температура гарячого повітря	$T_{гс}$	$^{\circ}C$	90	± 0.5	± 5	60
---------------------------------	----------	-------------	----	-----------	---------	----

Структурна схема об'єкта зображена на рисунку 2.

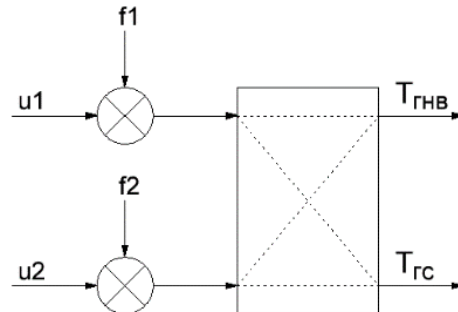


Рис. 2 - Структурна схема об'єкта.

Регульовані змінні: $T_{гнв}$ - Стабілізація температури переохолодження повітря; $T_{гс}$ - Стабілізація температури гарячого повітря.

Керуючі впливи: U_1 - зміна струму живлення термоелектричного охолоджувача; U_2 - зміна струму живлення термоелектричного нагрівача.

Для вивчення динамічних властивостей основних каналів перетворень на імітаційній моделі рекуператора тепла в середовищі Matlab Simulink були організовані експерименти, в яких стабілізувались всі параметри процесу, крім досліджуваного, який ступінчасто змінювався. На основі отриманих даних проведена параметрична ідентифікація моделей динаміки першого порядку каналів $U_1 - T_{гнв}$ та $U_2 - T_{гс}$ за методикою Мініної, результати якої представлені на рисунках 3 та 4 відповідно та в таблиці 3.

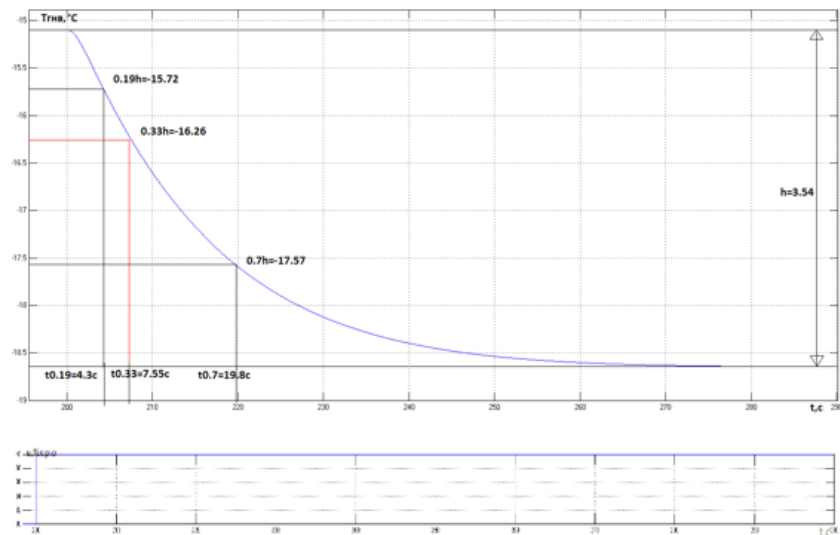


Рис.3 – Параметрична ідентифікація моделі ОК $U_1 - T_{гнв}$

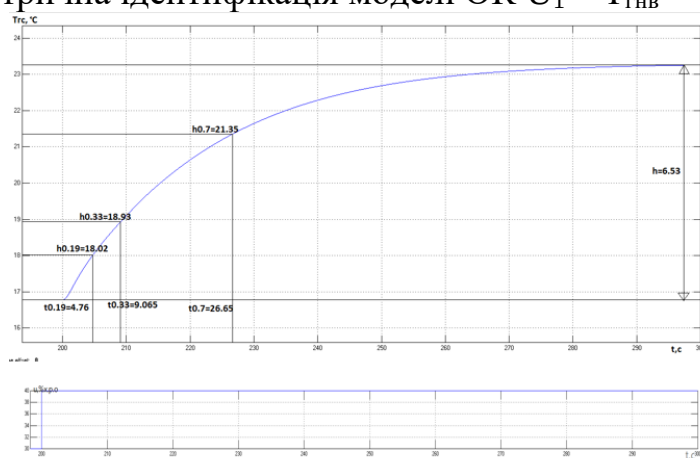


Рис.4 – Параметрична ідентифікація моделі ОК $U_2 - T_{гс}$

3.Результати ідентифікації моделей динаміки процесу гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла

Канал ОК	Модель динаміки першого порядку
$U_1 - T_{гнв}$	$W_0(p) = \frac{-0,33 \cdot e^{-1,425p}}{15,3p + 1}$
$U_2 - T_{гс}$	$W_0(p) = \frac{0,65 \cdot e^{-0,27p}}{21,9p + 1}$

Параметричний синтез САР з ПІД-алгоритмом регулювання і їх перевірка на грубість

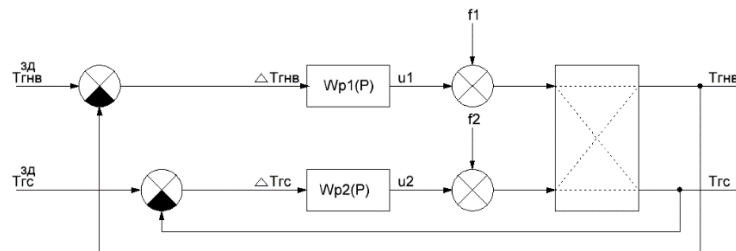


Рис.5 – Структурна схема системи керування лабораторною установкою базової структури

На рисунку представлено: $T_{\text{ГНВ}}^{\text{зд}}$ - задане значення переохолодженого повітря, $\Delta T_{\text{ГНВ}}$ - помилка регулювання температури переохолодженого повітря, $T_{\text{ГНВ}}$ – температура переохолодженого повітря, $T_{\text{ГС}}^{\text{зд}}$ - задане значення гарячого повітря, $\Delta T_{\text{ГС}}$ - помилка регулювання температури гарячого повітря, $T_{\text{ГС}}$ – температура гарячого повітря, $U1$ – струм живлення термоелектричного охолоджувача, $U2$ – струм живлення термоелектричного нагрівача, $f1$ – вектор неконтрольованих збурень, $f2$ - вектор неконтрольованих збурень, $Wp1(P)$ – передатна функція регулятора температури переохолодження повітря, $Wp2(P)$ – передатна функція регулятора температури гарячого повітря.

В якості алгоритму регулювання обираємо пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) алгоритми регулювання.

Параметри ПІД-регуляторів розраховані за методикою Капеловича наведені в таблиці 4.

4.Параметри ПІД-регуляторів розраховані за методикою Капеловича

Параметр	ПІД-регулятор температури $T_{\text{ГНВ}}$	ПІД-регулятор температури $T_{\text{ГС}}$
K_p	-24.2	98.8
T_{iz}	3.42	0.654
$T_{пр}$	1.06	1.06

Параметричну оптимізацію параметрів налаштувань ПІД-регуляторів температури переохолодженого повітря $T_{\text{ГНВ}}$ та температури гарячого повітря $T_{\text{ГС}}$ проведено за модульним інтегральним критерієм у середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink. Результати оптимізації налаштувань ПІД-регуляторів представлено у таблицях 5, 6.

5.Результати параметричної оптимізації налаштувань ПД-регулятора температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$.

Назва змінної	Оптимальне значення	Нижнє обмеження	Початкове наближене	Верхнє обмеження	Значення критерію оптимальності:
Kr	-91.1215	-100	-24.2	-1	до — 24.2244 після — 13.4903 оптимізації.
Tiz	0.58126	0.01	3.42	15	Кількість шагів процедури оптимізації: максимальне — 1500 фактичне - 161
Trp	0.82834	0.01	1.06	10	

6.Результати параметричної оптимізації налаштувань ПД-регулятора температури гарячого повітря $T_{гс}$.

Назва змінної	Оптимальне значення	Нижнє обмеження	Початкове наближене	Верхнє обмеження	Значення критерію оптимальності:
Kr	250	1	98.8	350	до — 11.2288 після — 7.7828 оптимізації.
Tiz	0.1997	0.01	0.654	10	Кількість шагів процедури оптимізації: максимальне — 500 фактичне - 21
Trp	0.38325	0.01	1.06	10	

Отримані САК з оптимізованими параметрами налаштувань ПД-регуляторів перевірені на грубість при дії параметричних збурень у середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink. Результати перевірки на грубість САК температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$ та гарячого повітря $T_{гс}$ наведено на рисунках 6 та 7 відповідно.

Значення параметрів об'єкта управління и значення критерия оптимальности.		
1. $k_1=1.2$ $k_2=1$ $J=12.2922$ $k_3=0.8$	2. $k_1=0.8$ $k_2=1$ $J=12.2922$ $k_3=0.8$	3. $k_1=1$ $k_2=1$ $J=12.2922$ $k_3=0.8$
4. $k_1=1.2$ $k_2=1.2$ $J=12.2925$ $k_3=0.8$	5. $k_1=0.8$ $k_2=1.2$ $J=12.2925$ $k_3=0.8$	6. $k_1=1$ $k_2=1.2$ $J=24.7385$ $k_3=1.2$
7. $k_1=1.2$ $k_2=0.8$ $J=24.7574$ $k_3=1.2$	8. $k_1=0.8$ $k_2=0.8$ $J=24.7574$ $k_3=1.2$	9. $k_1=1$ $k_2=0.8$ $J=24.7574$ $k_3=1.2$

Рис. 6 - Аналіз на грубість САК температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$ з ПД-регулятором

Значения параметров объекта управления и значения критерия оптимальности.		
1. $k_1=1.2$ $k_2=0.8$ $J=8.2606$	2. $k_1=0.8$ $k_2=0.8$ $J=8.2606$	3. $k_1=1$ $k_2=0.8$ $J=8.2606$
4. $k_1=1.2$ $k_2=1$ $J=8.2606$	5. $k_1=0.8$ $k_2=1$ $J=8.2606$	6. $k_1=1$ $k_2=1$ $J=8.4181$
7. $k_1=1.2$ $k_2=0.8$ $J=8.4235$	8. $k_1=0.8$ $k_2=0.8$ $J=8.4235$	9. $k_1=1$ $k_2=0.8$ $J=8.4235$

Рис. 7 - Аналіз на грубість САР температури гарячого повітря $T_{гс}$ з ПІД-регулятором

У середовищі імітаційного моделювання Matlab Simulink отримані перехідні характеристики САР з оптимальними налаштуваннями ПІД-регуляторів температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$ та гарячого повітря $T_{гс}$. Перехідні характеристики наведено на рисунках 8 та 9.

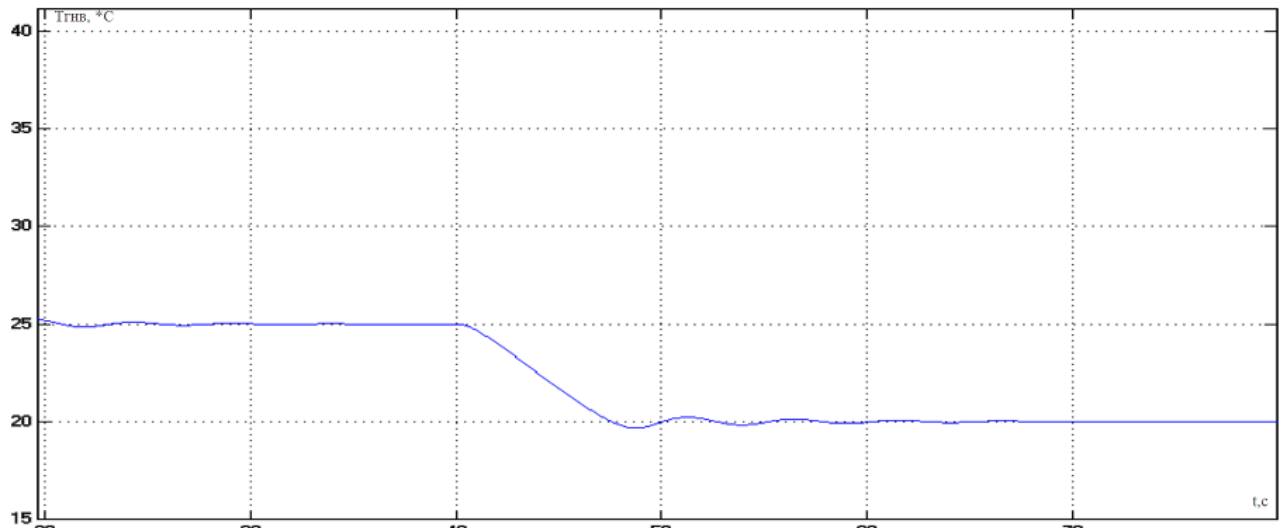


Рис. 8 - Перехідна характеристика САР з оптимальними налаштуваннями ПІД-регулятора температури переохолодженого повітря $T_{гнв}$ при східчастому вхідному впливі.

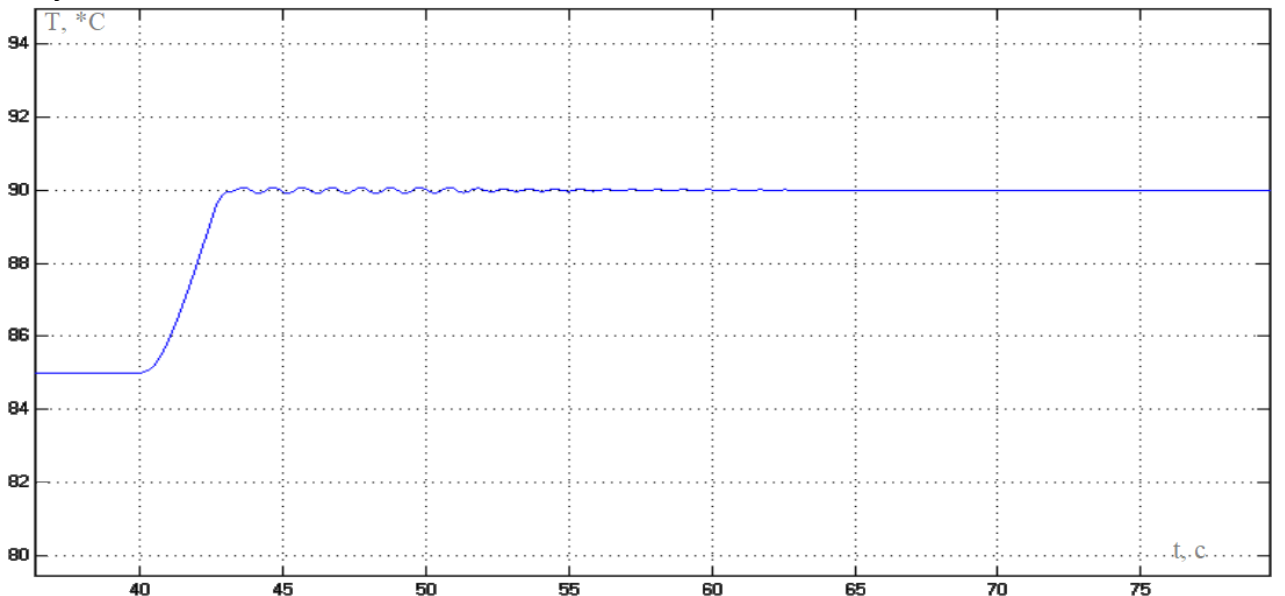


Рис. 9 - Перехідна характеристика САР з оптимальними налаштуваннями ПІД-регулятора температури гарячого повітря $T_{гс}$

Висновки і перспективи

Аналіз технологічного процесу термічної обробки ковбаси(жарки) показав, що концептуально процес можна представити двома регульованими координатами: температурою переохолодженого повітря $T_{гнв}$, температурою гарячого повітря $T_{гс}$, а також двома керуючими діями - струмом живлення термоелектричного нагрівача повітря та струмом живлення термоелектричного охолоджувача нормалізатора вологості. Усі збурення процесу доцільно віднести до неконтрольованих збурень.

Представлені в роботі дані використовуються для синтезу і аналізу САК підвищеної динамічної точності управління технологічним процесом гарячого копчення ковбас в термокамері з термоелектричним рекуператором тепла.

Синтез САР проведено в два етапи. На першому етапі розрахунок налаштувань регулятора проводився за інженерними методиками Копеловича, а на другому етапі було застосовано оптимальний параметричний синтез. В якості критерію використано інтегральний модульний критерій. В якості базового алгоритму регулювання температури охолодженого повітря $T_{гнв}$ та температури догрітого повітря $T_{гс}$ будемо використовувати ПД-алгоритм.

Список використаних джерел

1. Gluesenkamp K. R., Patel V. K., Momen A. M. Efficiency limits of evaporative fabric drying methods //Drying Technology. – 2021. – Т. 39. – №. 1. – С. 104-124.
2. Ярошевич М. В. Ефективність використання термоелектричного теплового насосу у відцентровому дистиляторі : дис. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
3. Анатичук Л. І., Кузь Р. В., Прибила А. В. (2014) Підвищення ефективності секційних термоелектричних рекуператорів тепла [Improving the efficiency of sectional thermoelectric heat recuperators]//Термоелектрика.. – №. 6. – С. 77-88.
4. Patel V. K. et al. Experimental evaluation and thermodynamic system modeling of thermoelectric heat pump clothes dryer //Applied energy. – 2018. – Т. 217. – С. 221-232.
5. Liu Z. et al. Experimental study and performance analysis of solar-driven exhaust air thermoelectric heat pump recovery system //Energy and Buildings. – 2019. – Т. 186. – С. 46-55.

6. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології» денної та заочної форми навчання.- Одеса: ОНАХТ, 2016 – 96с.

7. Хобін В. А. Конспект лекцій з курсу «Теорія автоматичного керування» для студентів, які навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології» денної та заочної форми навчання.- Одеса: ОНАХТ, 2012.- Ч1 – 112с.

Referense

1. Gluesenkamp, K. R., Patel, V. K., & Momen, A. M. (2021). Efficiency limits of evaporative fabric drying methods. *Drying Technology*, 39(1), 104-124.

2. Yaroshevych, M. V. (2022). Efektyvnist vykorystannia termoelektrychnoho teplovoho nasosu u vidtsentrovomu dystyliatori [Efficiency of Thermoelectric Heat Pump Use in Centrifugal Distiller] (Masters thesis, KPI im. Ihoria Sikorskoho).

3. Yaroshevych, M. V. (2022). Efektyvnist vykorystannia termoelektrychnoho teplovoho nasosu u vidtsentrovomu dystyliatori [Efficiency of Thermoelectric Heat Pump Use in Centrifugal Distiller] (Masters thesis, KPI im. Ihoria Sikorskoho).

4. Anatychuk, L. I., Kuz, R. V., & Prybyla, A. V. (2014). Pidvyshchennia efektyvnosti sektsiinykh termoelektrychnykh rekuperatoriv tepla [improving the efficiency of sectional thermoelectric heat recuperators]. *Termoelektryka*, (6), 77-88.

5. Liu, Z., Li, W., Zhang, L., Wu, Z., & Luo, Y. (2019). Experimental study and performance analysis of solar-driven exhaust air thermoelectric heat pump recovery system. *Energy and Buildings*, 186, 46-55.

6. Khobin V. A. (2016) Konspekt leksii z kursu «Identyfikatsiia ta modeliuvannia tekhnolohichnykh obiektiv» dlia studentiv, yaki navchaiutsia za spetsialnistiu 151 «Avtomatyzatsiia ta kompiuterno intehrovani tekhnolohii» dennoi ta zaochnoi formy navchannia [Lecture notes on the course "Identification and modeling of technological objects" for students studying in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies" of full-time and part-time education]. Odesa: ONAFT. – 96p.

7. Khobin V. A. (2012) Konspekt leksii z kursu «Teoriia avtomatychnoho keruvannia» dlia studentiv, yaki navchaiutsia za spetsialnistiu 151 «Avtomatyzatsiia ta kompiuterno intehrovani tekhnolohii» dennoi ta zaochnoi formy navchannia [Lecture notes on the course "Theory of automatic control" for students studying in the specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies" of full-time and part-time education]. Odesa: ONAFT. - Part 1 - 112p.

Abstract. The work is devoted to the development of a system of automatic control of hot smoking of sausage in a thermal chamber with a thermoelectric heat recuperator. A parameterized technological diagram of the process as a control object has been developed, the main parameters subject to regulation and their technological regulations - air subcooling temperature T_{gnv} and hot air temperature T_{gs} - and corresponding control actions: power supply current of the thermoelectric cooler and

power supply current of the thermoelectric heater have been developed. A structural scheme of the technological process of hot smoking of sausage in a thermal chamber with a thermoelectric heat recuperator has been developed. The method of simulation modeling of obtaining the dynamic latency of the main channels of the transformation of the object. From the recorded transient characteristics, the transfer functions of channel regulation were determined. A parametric and optimal synthesis of SAC of air subcooling temperature T_{gnv} and hot air temperature T_{gs} was carried out. The obtained SACs are checked for roughness under the action of parametric disturbances.

Key words: *thermoelectric converter, heat recovery, automatic control system, hot smoking.*

ДОДАТОК Д

Authors: Dmytro Petrenko
Serhii Pashkov

Advisor: Dmytro Kovalchyk
Odesa National University of Technology (Ukraine)

Abstract. *The structure of the programmable current source has been developed. The issue of its hardware and software implementation is considered. A PLC with the codesys execution environment was developed on the basis of a beaglebone black single-board computer. The functional capabilities of the beaglebone black single-board computer, as well as the features of working with it, are considered. Functionality of the codesys execution environment is considered.*

Key words: *PLC, TEC, programmable current source, codesys execution environment, Modbus communication protocol , heat pump .*

I. INTRODUCTION

Industrial PLC programmable logic controllers have become an integral part of modern control systems. Although the number and variety of tasks set before mine are only growing, most PLCs have a closed and rigid architecture and, in this regard, relatively limited functionality. The price and specific features of operation of such PLCs make it difficult to use them for home automation and for educational purposes.

Recently observed growth demand for use energy-efficient and energy-saving technologies. It causes trend application thermal pumps, including widely start to be used thermoelectric heat pumps. A feature of such units is necessity power supply with a large current at relatively small voltage. Therefore, the development of a programmable power source for use in an embedded thermoelectric heat pump control system is an urgent task.

II. LITERATURE ANALYSIS

BeagleBone ® Black [1] is a low-cost development platform with high level extension that is supported community , for developers and hobbyists. Users they can download Linux [2] less than in 10 seconds and start development less than in 5

minutes with help only one USB cable. It was equipped with a minimal set of peripherals to allow the user to experience the power of the processor, while also offering access to many interfaces and allowing the use of add-on boards called capes to add many different combinations of functions [3]. The CODESYS runtime environment contained in the product is especially adapted that the Beaglebone Black, the community supported hardware. With a CODESYS single device license (SL), users can permanently realize a PLC device and use functions of the freely available development environment CODESYS Development System that configure it in IEC 61131-3.

The software package contains an extension for the CODESYS programming environment, with which an update mechanism is integrated in order that install the runtime environment on the BeagleBone Black without LINUX knowledge. The installation of the CODESYS Runtime component on the BeagleBone Black takes place in the form of a Debian package, directly from the CODESYS Development System [4].

Laboratory power supply unit DC-DC 0-50 V 20 A DPS5020 is a powerful programmed source step-down power supply DC-DC converter, LCD display and external communication. Ideally suitable for creating a powerful laboratory power supply unit. It consists of 2 modules: control and power, connected by a cable 20 cm long [5].

III. OBJECT, SUBJECT AND RESEARCH METHODS

Formulation of the purpose of the work. the development of a PLC that will have an open architecture, a powerful execution environment, will support most modern communication protocols, will have a wide range of functionality and, at the same time, a low price; development of a powerful programmable reversible current source for use in control systems thermoelectric heat pumps, which at power from 1 kW should correspond next requirements: mother high efficiency (minimum 90%), minimal mass and dimensional characteristics, digital remote management, consist of standard components that are available in bulk production.

Object research is programmable reversible current source for use in control systems thermoelectric heat pumps with a PLC control controller based on a beaglebone black single-board computer with the Linux operating system (OS).

The subject of research is development programmable reversible _ current sources for use in control systems thermoelectric heat pumps with a PLC control controller based on a beaglebone black single-board computer with the Linux operating system (OS).

Methods research: the method of object - oriented programming, the method of computer modeling, the method of programming real-time systems.

IV. RESULTS

Source feeding consists of an AC/DC converter (AC 230 V / DC 48 V 20 A), controlled current sources (0-10A, 45 V max), controlled current reverse bridge driver and PLC control controller. The structural diagram is presented in Figure 1.



Figure 1 - Structural diagram of a powerful programmable current sources for use in control systems thermoelectric heat pumps

Figure 2 shows used standard blocks of which consists source power supply. For implementation AC / DC converter used two in a row included power supplies AC/DC CB -500 W -24 V (a). As programmable sources current is used DC-DC converter with digital management DPS 5020 (b), manager programmed the logic controller (PLC) is implemented on a single-board computer beaglebone black with Codesys executive system, managed the bridge driver is implemented on four field transistors, control current source is carried out according to the Modbus protocol .

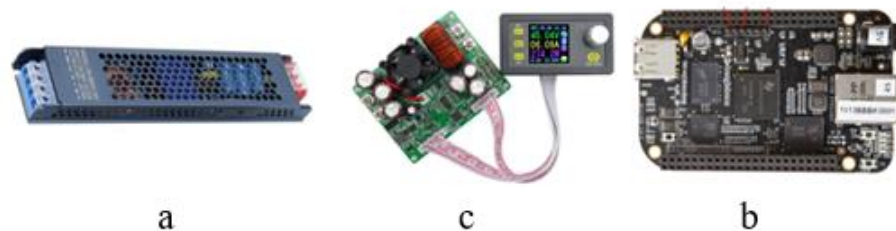


Figure 2 - a - power supply unit AC / DC CB -500 W -24 V; b - DC-DC converter DPS5020; single-board computer beaglebone black

A beaglebone single-board computer was chosen for the implementation of the control controller PLC, oriented for use in a programmable power source black with the Linux operating system (OS).

Power board beaglebone black occurs by a USB cable, or an external 5V DC power supply, but this is rarely required. Communication with a PC is provided by a USB cable or a LAN port (Fig. 3).

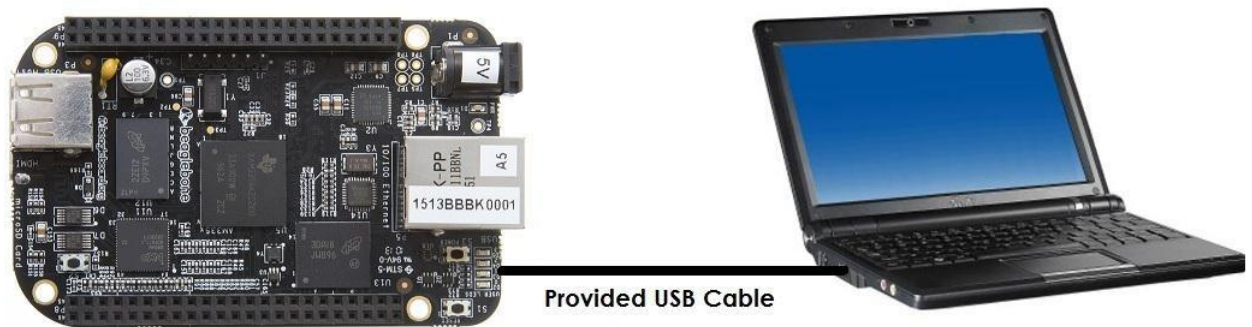


Figure 3 - beaglebone connection black to PC via USB cable

The type of bootable OS image depends on the amount of eMMC memory of the beaglebone black. It is possible to install the Linux distribution on the eMMC board from an SD storage device. Launching the OS is also available directly from the SD storage. The progress of the OS installation can be monitored using the terminal program of a personal computer (PC) by connecting the beaglebone black through an external UART / USB converter to a PC (Fig. 4). For stable operation of the system, install the most modern version of Debian .

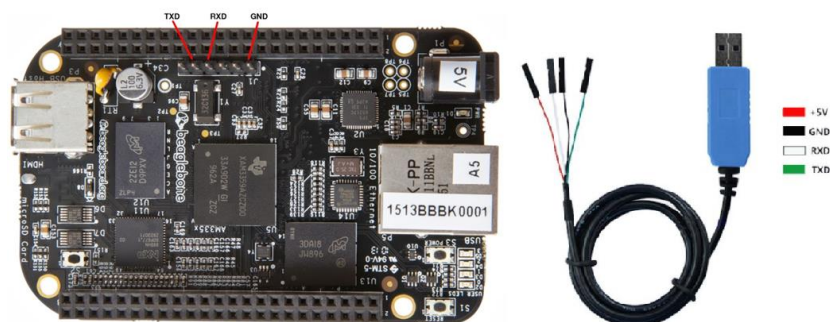


Figure 4 - beaglebone black external UART / USB converter

After successful installation of Linux OS on beaglebone black install the codesys executive system (Fig. 5).

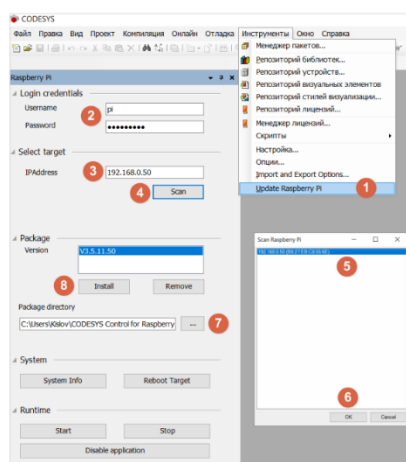


Figure 5 - the codesys executable on beaglebone black

A feature of the beaglebone black is that most of the GPIO contacts of the board can have several assignments (Fig. 6), which we configure depending on the task at hand. Communication between the controller and the power source is carried out by UART .

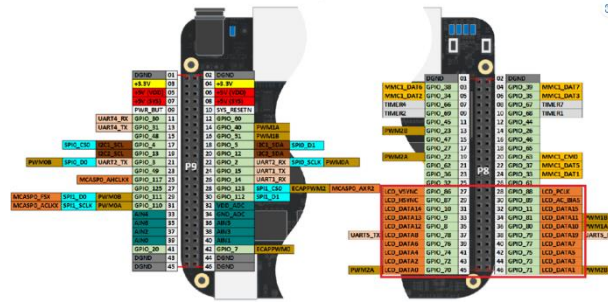


Figure 6 – Beaglebone pin assignments black

Pin functions are configured by editing the beaglebone configuration files black through Putty - a PC terminal program (Fig. 7).

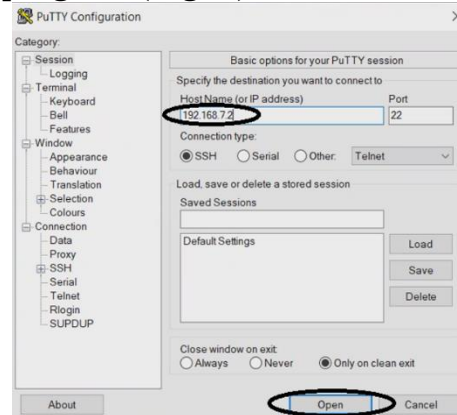


Figure 7 – the window of the terminal program

```
login as: debian
Pre-authentication banner message from server:
Debian GNU/Linux 10

| BeagleBoard.org Debian Buster Console Image 2023-05-03
| Support: https://bbb.io/debian
| default username:password is [debian:temppwd]
|
End of banner message from server
debian@192.168.7.2's password:

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Thu Jul 6 13:38:07 2023 from 192.168.7.1
debian@beaglebone:~$ sudo nano /boot/uEnv.txt
[sudo] password for debian:
debian@beaglebone:~$
```

Figure 8 – beaglebone terminal window black

In the beaglebone terminal window black login (default login: debian , password: temppwd). To access the editing of the configuration file, execute the sudo command nano / boot /uEnv.txt (Fig. 8). After completion, save the edited configuration file for further use.

To activate UART , you need to find the line #uboot_overlay_addr4=<file4> in the configuration file. dtbo , and replace it with uboot_overlay_addr4=/ lib / firmware /BB-UART1-00A0.dtbo.

A fragment of the program management converter DC-DC DPS 5020 by

Modbus protocol for executive environment Codesys is shown in Figure 9.

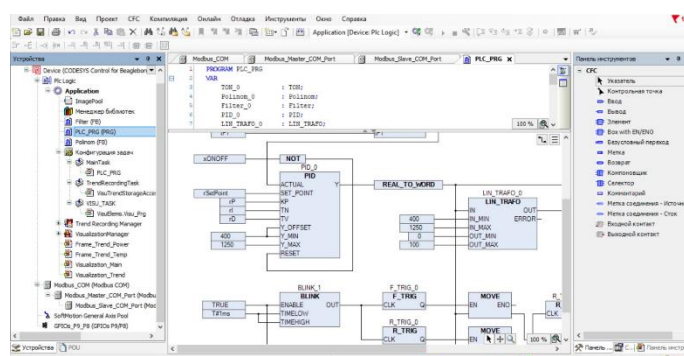


Figure 9 - Fragment of the program in the executive environment CoDeSys .

In the role Master stands out beaglebone black, in the role Slave stands out transformer DC - DC DPS 5020. At the same time, up to one Modbus Master can be at the same time connected to 256 Modbus Slave . In total beaglebone black has 6 UARTs ports, they are numbered from 0 to 5. Executive environment CoDeSys perceives them as COM ports numbered 1 to 6, respectively. The 1st COM port is used for external terminal, therefore in the project for work select COM2 (UART 1). During setup Modbus Slave in executive environment CoDeSys necessary use the table of registers DC-DC converter (Table 1).

Table 1. Table registers DC - DC converter

Function	Description	Number bytes	Decimal marks	Unit	Read write	Register address
U-SET	Given value voltage	2	2	IN	R/W	0000H
I-SET	Given current value	2	2	AND	R/W	0001H
UOUT	Actual value outgoing voltage	2	2	IN	R	0002H
IOUT	Actual value output current	2	2	AND	R	0003H
POWER	Actual value outgoing power	2	1 or 2	IN	R	0004H
UIN	Actual value incoming voltage	2	2	IN	R	0005H
LOCK	Locking bodies management	2	0	-	R/W	0006H
PROTECT	Protection status	2	0	-	R	0007H
CV/CC	The state is permanent voltage / direct current	2	0	-	R	0008H
ONOFF	The initial state of the converter	2	0	-	R/W	0009H

To choose active Select the COM port in the project tree unit MODBUS _ COM and indicate the working port number (Fig. 10).

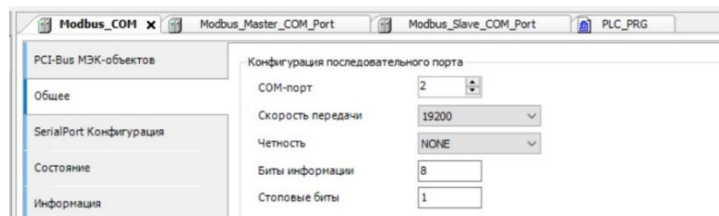


Figure 10 - settings Modbus in the project .

To configure of the MODBUS protocol parameters in the project tree successively subdivisions MODBUS _ MASTER and MODBUS _ Slave and enter the following parameters: transmission protocol RTU, response timeout 1000ms, time interval between frames 10ms, Modbus address Slave1, auto restart connection (Fig.11).

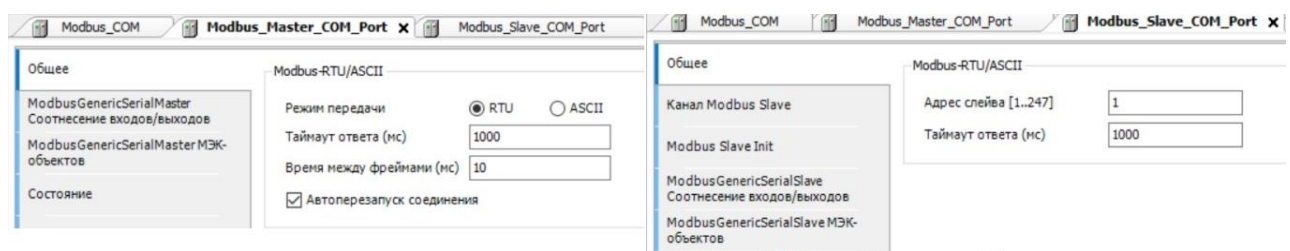


Figure 11 - settings Modbus Master and Modbus Slave in executive environment CoDeSys .

To configure channels Modbus Slave in the project tree, select the Modbus Channel item slave and form table registers and commands (table 1) according to the documentation DPS 5020 (Fig. 12).

Имя	Тип доступа	Триггер	Сдвиг READ	Длина	Обработка ошибок	Сдвиг WRITE	Длина	Комментарий
0 W_USET	Write Single Register (Код функции 06)	Передний фронт	16#0002	1	Сохранить посл. значение	16#0000	1	
1 R_UOUT	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0003	1	Сохранить посл. значение	16#0001	1	
2 W_ISET	Write Single Register (Код функции 06)	Передний фронт	16#0003	1	Сохранить посл. значение	16#0009	1	
3 R_IOUT	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт	16#0009	1	Сохранить посл. значение			
4 W_ONOFF	Write Single Register (Код функции 06)	Передний фронт	16#0004	1	Сохранить посл. значение			
5 R_ONOFF	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт						
6 R_POWER	Read Holding Registers (Код функции 03)	Передний фронт						

Figure 12 - a table registers and commands

For binding channels Modbus Slave to the project variables in the project tree, select the ModbusGenericSerialSlave item (Figure 13).

Переменная	Соотнесение	Канал	Адрес	Тип	Единица	Описание
Application.PLC_PRG.WriteUSET2	W_USET2	%QW0-0	BIT			Триггерная переменная
Application.PLC_PRG.USET2	W_USET[0]	%QW1	ARRAY [0..0] OF WORD			Write Single Register
Application.PLC_PRG.xReadUOUT2	R_UOUT	%QW1	WORD			0x0000
Application.PLC_PRG.xReadUOUT2	R_UOUT	%QW0	BIT			Триггерная переменная
Application.PLC_PRG.UOUT2	R_UOUT[0]	%IW0	ARRAY [0..0] OF WORD			Read Holding Registers
Application.PLC_PRG.xWriteISET2	W_ISET	%QW0	WORD			0x0002
Application.PLC_PRG.xWriteISET2	W_ISET	%QW1	BIT			Триггерная переменная
Application.PLC_PRG.xWriteISET2	W_ISET	%QW3	ARRAY [0..0] OF WORD			Write Single Register

Figure 13 - ratio registers to project variables

Using bodies management DC - DC converter we adjust Slave address and speed exchange given.

Figure 14 shows the structural diagram of a reversible current source for powering six thermoelectrics converters (TEP) TEC 1-12710 which are included in two parallel chains each of which is consecutive a collection of three TEPs. For alignment differences currents in circuits successively included balancing resistors.

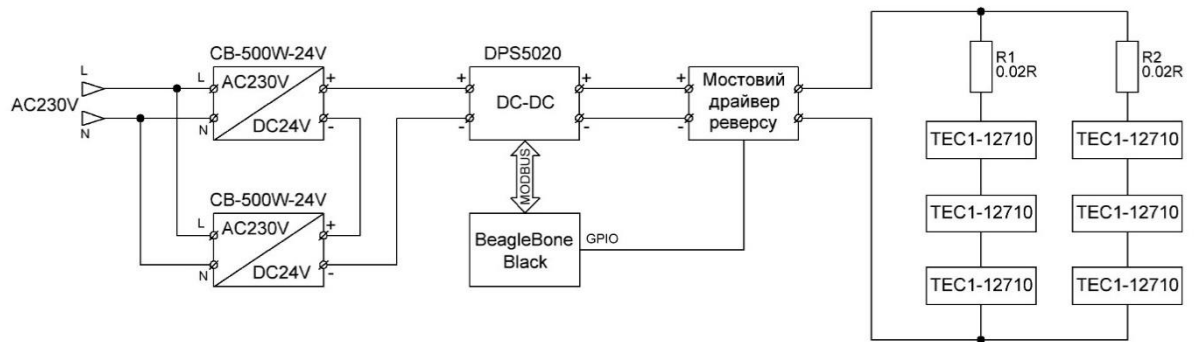


Figure 14 is an electrical scheme connections.

V. CONCLUSIONS

So based on available hardware and software (beaglebone black + codesys v 3.5) we got a PLC with open architecture and support for UART, I2C, SPI, USB 2.0, mini - USB, Ethernet, HDMI, 7 AI, 45 DI / DO, PWM interfaces.

Developed programmed current source at relatively small has mass and dimensional characteristics maximum power up to 1000 W at a current of up to 20A, while saving the efficiency value is high levels (94-96%), supports possibility of digital remote management according to the MODBUS protocol, consists of publicly available elements worth up to 120 USD.

VI. REFERENCES

1. [BeagleBone Black is a BeagleBoard Documentation](https://docs.beagleboard.org/latest/boards/beaglebone/black/index.html) - <https://docs.beagleboard.org/latest/boards/beaglebone/black/index.html>
2. [Beagleboard: BeagleBoneBlack Debian](https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#U-Boot_Overlays) - [eLinux.org](https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#U-Boot_Overlays) - https://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian#U-Boot_Overlays
3. [Setting Up the BeagleBone Black's GPIO Pins \(vadl.github.io\)](https://vadl.github.io/beagleboneblack/2016/07/29/setting-up-bbb-gpio) - <https://vadl.github.io/beagleboneblack/2016/07/29/setting-up-bbb-gpio>
4. [CODESYS Control for BeagleBone SL | CODESYS Store International](https://store.codesys.com/en/codesys-control-for-beaglebone-sl.html) - <https://store.codesys.com/en/codesys-control-for-beaglebone-sl.html>
5. DPS 5020 file - Google Drive - https://drive.google.com/drive/folders/1Yexv_WoXYMtnnO4fUvltQDUX7falAo2N

ДОДАТОК Д

Петренко Д. С.

Магістрант кафедри АТПіРС ОНТУ

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-7739-5755>

dmytropetrenko00@gmail.com

Мазур О. В.

Доцент кафедри АТПіРС ОНТУ; к.т.н.

Одеський національний технологічний університет

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0001-7104-9010>

mazur.a.v.ua@gmail.com

Пашков. С. О.

Магістрант кафедри АТПіРС ОНТУ

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-0202-7015>

sergypashkov2001@gmail.com

Ковальчук Д.А.

ст. викладач ОНТУ, к.т.н.

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-0549-5244>

radiolomaster@gmail.com

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО РЕКУПЕРАТОРА ТЕПЛА "ПОВІТРЯ - ПОВІТРЯ" ЯК ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

Анотація. Доповідь присвячена розробці імітаційної математичної моделі термоелектричного рекуператора тепла "повітря - повітря" як об'єкту керування, що включає в себе три основні складові: модель термоелектричного перетворювача, модель теплопередачі через плоску стінку та модель конвективного теплообміну. Імітаційна модель реалізована в середовищі Matlab Simulink.

Ключові слова: термоелектричний перетворювач, теплопередача, конвективний теплообмін, математична модель.

1.ВСТУП. Використання термоелектричних перетворювачів (ТЕП) для рекуперації теплової енергії паро-повітряних сумішей при реалізації технологічних процесів харчових технологій дозволяє суттєво зменшити енергетичні витрати і знизити собівартість готової продукції. Енергетична ефективність ТЕП при реалізації таких процесів в значній мірі залежить від здатності системи керування підтримувати енергоефективні режими рекуперації. Розробка ефективних систем автоматичного керування (САК) неможлива без наявності імітаційної аналітичної математичної моделі такого процесу як об'єкту керування (ОК).

2.ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Математична модель термоелектричного рекуператора тепла «повітря – повітря» як ОК включає в себе три основні складові: модель ТЕП, модель теплопередачі через «плоску стінку» та модель конвективного теплообміну «стінка-повітря»

2.1. Для розрахунку конвективного теплового потоку Q_k скористаємося наступною залежністю

$$Q_k = F \cdot a \cdot (t_{ст} - (t_{пвх} + t_{пвих})/2) \quad (1)$$

Де: F – площа поверхні плоскої стінки, a – коефіцієнт теплопередачі $Вт/(м^2 \cdot К)$ в залежності від швидкості руху середовища відносно стінки, $t_{ст}$ – температура стінки, $t_{пвх}$, $t_{пвих}$ – температура повітря на вході та виході рекуператора відповідно.

2.2. При розробці моделі радіатора рекуператора як ОК приймемо спрощення, що радіатор є плоскою стінкою з середнім тепловим опором R_{al} . В такому разі тепловий потік крізь радіатор розраховується наступним чином

$$Q_{ст} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot F \cdot (t_{ст1} - t_{ст2}) \quad (2)$$

Теплова енергія що витрачається на зміну температури стінки радіатора рекуператора

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t \quad (3)$$

Де: λ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності, F – площа поверхні плоскої стінки, δ – товщина стінки, $t_{ст1}$, $t_{ст2}$ – температури стінки з гарячої та холодної сторони відповідно, c – теплоємність радіатора, Δt – зміна температури радіатора, m – маса радіатора.

2.3. Тепловий баланс з «холодного» боку ТЕП

$$\begin{aligned} Q_x &= Q_{хст} - Q_{нхст} = Q_{хк} \\ Q_{хст} &= \frac{\lambda}{\delta} \cdot F_{хст} \cdot \Delta T_{хст} \\ Q_{хк} &= F_x \cdot \alpha_x \cdot \left(t_{хст} - \frac{(t_{хпвх} + t_{хпвих})}{2} \right) \\ Q_{нхст} &= c_{хст} \cdot m_{хст} \cdot (t_{хст1} - t_{хст2}) \end{aligned}$$

2.4. Тепловий баланс з «гарячого» боку ТЕП

$$\begin{aligned} Q_{г} &= Q_x + P = Q_{гст} - Q_{нгст} = Q_{гк} \\ Q_{гст} &= \frac{\lambda}{\delta} \cdot F_{гст} \cdot \Delta T_{гст} \\ Q_{гк} &= F_{г} \cdot \alpha_{г} \cdot \left(t_{гст} - \frac{(t_{гпвх} + t_{гпвих})}{2} \right) \\ Q_{нгст} &= c_{гст} \cdot m_{гст} \cdot (t_{гст1} - t_{гст2}) \end{aligned}$$

Де: написать

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

В результаті аналізу процесів що протікають в термоелектричному рекуператорі тепла «повітря - повітря» як ОК для його математичної моделі була прийнята наступна структура (рис.1).

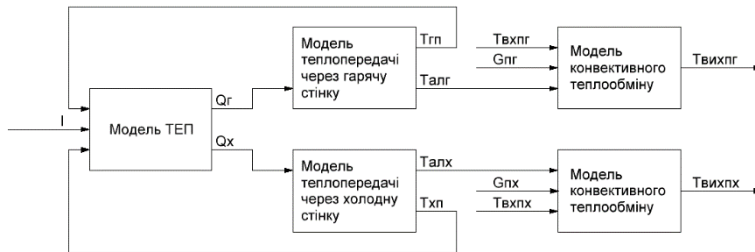


Рис. 1 - Структурна схема математичної моделі термоелектричного рекуператора тепла «повітря-повітря» як ОК.

На рисунку прийняті наступні позначення: I – струм живлення ТЕП, Q_g – тепловий потік від гарячої сторони ТЕП, Q_x – тепловий потік від холодної сторони ТЕП, $T_{гп}$ – температура гарячої сторони ТЕП, $T_{хп}$ – температура холодної сторони ТЕП, $Sp_{г}$ та $Sp_{х}$ – швидкість руку потоку повітря, $T_{алг}$ та $T_{алх}$ – температура поверхні радіатора з гарячої та холодної сторони відповідно.

3.1. Математична модель термоелектричного перетворювача (ТЕП). Величини «холодного» Q_x та «гарячого» теплового потоку Q_g ТЕП описуються рівняннями (10) та (11) відповідно.

Величина «холодного» теплового потоку може бути описана з рівняння (3.1.1).

$$Q_x = -\frac{\Delta T}{\theta_m} + \alpha_m \cdot T_a \cdot I - \frac{I^2 R_m}{2} \quad (3.1)$$

Величина «гарячого» теплового потоку дорівнює є сумі ефекту Пельтьє ($\alpha_m T_l$), теплопровідності елемента (t / θ_m) і теплового ефекту Джоуля ($I^2 R_m$). Дію ефекту Томсона не описуємо оскільки вона не значна. Описується залежністю (3.2).

$$Q_g = -\frac{\Delta T}{\theta_m} + \alpha_m \cdot T_a \cdot I + \frac{I^2 R_m}{2} \quad (3.2)$$

Параметри α_m , θ_m і R_m можуть бути розраховані з листа даних виробників відповідно до рівнянь (3.3 – 3.5).

$$R_m = \frac{V_{max}}{I_{max}} \cdot \frac{(T_e - \Delta T_{max})}{T_e} \quad (3.3)$$

$$\theta_m = \frac{\Delta T_{max}}{I_{max} \cdot V_{max}} \cdot \frac{2 \cdot T_e}{(T_e - \Delta T_{max})} \quad (3.4)$$

$$\alpha_m = \frac{V_{max}}{T_e} \quad (3.5)$$

Де: I_{max} – максимально допустимий струм, V_{max} – напруга яка виникає на термоелементі при I_{max} , ΔT_{max} – максимально допустима різниця температур між холодною та гарячою стороною, Q_x – холодний тепловий потік, Q_g – гарячий тепловий потік, R_m – електричний опір термоелемента [Ом], θ_m – тепловий опір елемента [K/W], α_m – коефіцієнт р-п переходу Зеебека [V/K], T_e – абсолютна температура теплої сторони [K], T_a – абсолютна температура холодної сторони [K].

3.2. Математична модель теплопередачі через плоску стінку. Математичні моделі температури поверхні радіатора з гарячої сторони $t_{ст1}$ (15) та поверхні радіатора з холодної сторони (16) мають вигляд:

$$T_{алг} = \left(\int \frac{Q_{гн} - (T_{ал.1} - T_{пвх}) * F_{ал} * a}{m_{ал} * c_{ал}} + T_{0_{вх}} \right)$$

$$T_{алх} = \left(\int \frac{(T_{пвх} - T_{ал.1}) * F_{ал} * a - Q_{хн}}{m_{ал} * c_{ал}} + T_{0_{вх}} \right)$$

Математичні моделі температури гарячої() та холодної() сторін ТЕП мають вигляд

$$T_{гп} = \int \frac{Q_{гп} - (T_{ал} - T_{пвх}) * F_{ал} * a}{m_{ал} * c_{ал}} + \frac{Q_{гп} * F_{ал} * R_{ал}}{h_{ал}}$$

$$T_{хп} = \int \frac{Q_{хп} - (T_{ал} - T_{пвх}) * F_{ал} * a}{m_{ал} * c_{ал}} - \frac{Q_{хп} * F_{ал} * R_{ал}}{h_{ал}}$$

3.3. Математична модель конвективного теплообміну. Математичні моделі температури повітря на виході з гарячої () та холодної () сторони рекуператора

$$T_{п_вих_г} = \frac{(T_{алг} - T_{возд_вх}) * F_{ал} * a}{m_{возд} * c_{возд}} + T_{возд_вх}$$

$$T_{п_вих_х} = \frac{(T_{алх} + T_{возд_вх}) * F_{ал} * a}{m_{возд} * c_{возд}} - T_{возд_вх}$$

На рисунку 2а представлено реалізацію в середовищі Simulink моделі тепломасообмінних процесів у випарнику та математичної моделі термоелектричного плівкового випарника як об'єкту керування.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Модель була застосована як складова частина загальної комірчастої моделі рекуперації тепла «повітря-повітря» технологічного процесу гарячого копчення ковбаси як ОК. На рисунку 2 представлені квазістатичні залежності температури гарячого (а) та холодного(б) повітря у рекуператорі від струму живлення ТЕП.

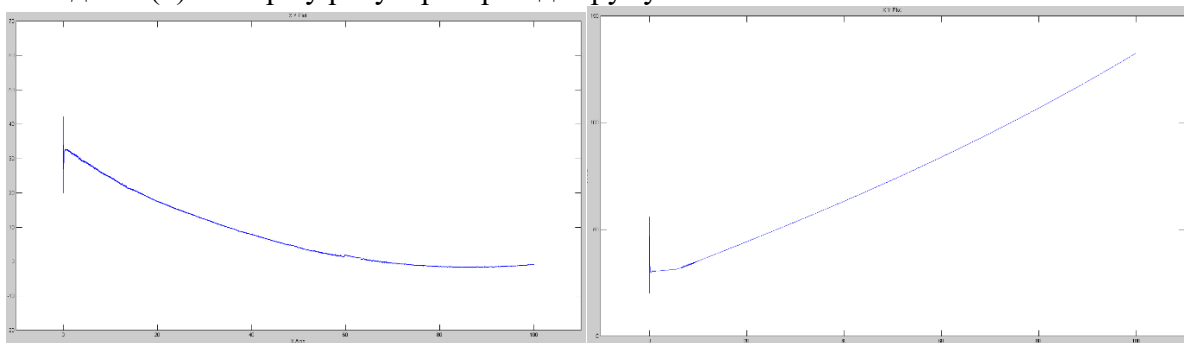


РИС.2-

У зв'язку з обмеженістю об'єму доповіді інші складові загальної моделі будуть розглянуті в наступних доповідях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] БОЙКО, Валентин Семенович, et al. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: підручник, книга 3.
- [2] DISALVO, Francis J. Thermoelectric cooling and power generation. Science, 1999, 285.5428: 703-706.